



**Daniela Tavares
Valente**

**Mecanismos inovadores para recuperação de
energia do movimento do mar**



**Daniela Tavares
Valente**

Mecanismos inovadores para recuperação de energia do movimento do mar

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões

Professor Coordenador com Agregação da Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos

Agradecimentos / Acknowledgements

Ao meu pai, que me transmitiu o gosto pela mecânica, que acompanhou e apoiou este projeto. À minha mãe, pelo incansável apoio emocional, que sofreu comigo ao longo desta jornada. A ambos, por trabalharem tanto para me darem as oportunidades que a eles a vida não permitiu. À minha irmã, que me mostrou que na vida há muito mais para além de trabalho, e me transmitiu o amor pela cidade de Aveiro e por esta universidade. Ao meu irmão gémeo, com quem partilhei este percurso académico e teve um impacto crucial no alcance dos meus objetivos. Aos meus colegas de laboratório, cuja boa disposição e ajuda facilitaram este processo. Ao meu orientador, Professor António Ramos, pela orientação e conhecimentos que me transmitiu. Ao meu co-orientador, Professor Jorge Ferreira, pela constante disponibilidade e gosto pelo projeto. Agradeço ao Engenheiro António Festas por dedicar parte do seu tempo à concretização do protótipo.

Palavras-chave

Energia das ondas; conversor de energia; gerador linear; plataforma flutuante.

Resumo

As reservas de combustíveis fósseis estão em risco de se esgotarem, para além de serem um grande contributo para o aquecimento global. As energias renováveis são uma solução para estes problemas incluindo a energia das ondas e marés que, em Portugal, têm um grande potencial. No entanto, esta energia renovável é a menos desenvolvida, com poucas contribuições para a rede elétrica mundial. Fez-se um estudo aos diversos mecanismos de conversão de energia das ondas existentes e apresentaram-se vários conceitos de mecanismos de conversão de energia das ondas com objetivo de solucionar alguns dos maiores problemas associados a estes mecanismos. Projetou-se e construiu-se um protótipo à escala do conceito com maior potencial para ser desenvolvido. Desenvolveu-se um tanque de testes de ondas onde o protótipo foi testado e adquiriram-se valores de deslocamento, tensão e potência elétrica. De forma a prever o comportamento do protótipo e fazer algumas adaptações antes da sua construção, desenvolveu-se uma simulação numérica do comportamento hidrodinâmico e energético. Apesar dos resultados mostrarem uma baixa energia gerada, tiraram-se várias conclusões relativas à estrutura e funcionamento do protótipo que permitem a sua evolução.

Keywords

Wave energy; energy converter; linear generator; floating platform.

Abstract

The fossil fuel reserves are running out, besides being a great contribution for the global warming. The renewable energies are a solution for this problems, including the wave and tides which have a great potential in Portugal. However, this renewable energy is the least developed, with few contributions for the electrical grid. A study about the existing wave energy conversion mechanisms was done and were presented various concepts with the purpose of presenting solutions to the major problems of the existing mechanisms. A scaled prototype was designed and built for the concept that presented most promising. A wave test tank was also developed to acquire values of displacement, voltage and electrical power. To predict the behavior and make some corrections before the construction of the prototype, a hydrodynamic and energetic numerical simulation of the concept was developed. Although the results show a low generated power by the prototype, multiple conclusions about structure and functionality were taken to enable the concept evolution.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
2	O Recurso da Energia das Ondas	5
2.1	A Costa Portuguesa	6
3	Revisão do Estado da Arte	9
3.1	Geradores Utilizados na Conversão de Energia das Ondas	9
3.2	Classificação dos Dispositivos	10
3.2.1	Atenuadores	11
3.2.2	Absorvedores Pontuais	15
3.2.3	Conversores Oscilantes de Translação	18
3.2.4	Colunas de Água Oscilante	20
3.2.5	Dispositivos de Galgamento ou Terminadores	20
3.2.6	Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão	23
3.2.7	<i>Bulge Wave</i>	24
3.2.8	<i>Rotating Mass</i>	24
3.2.9	Outros	27
3.3	Problemas Associados aos Dispositivos Conversores de Energia das Ondas	28
4	Desenvolvimento do Conceito	31
4.1	Conceitos Iniciais	31
4.1.1	Análise dos Conceitos Propostos	31
4.2	Desenvolvimento do Conceito Final	36
4.3	Desenvolvimento e Materiais do Protótipo	38
4.3.1	Projeto para Bobinagem	44
4.4	Tanque de Ondas	45
5	Modelação Numérica	51
5.1	Simulação do Campo Magnético	51
5.2	Modelação Dinâmica dos Módulos	52
6	Ensaio Experimentais e Resultados	59
6.1	Ensaio Funcionais de Estrutura e Evolução do Protótipo	59
6.2	Ensaio de Avaliação de <i>Performance</i>	63
6.2.1	Estação de Testes	64

6.2.2 Resultados Experimentais	64
7 Discussão de Resultados e Conclusões	69
8 Projetos Futuros	71
Anexos	79
A Dados das Boias Ondográficas	79
B Desenhos Técnicos dos Componentes do Protótipo	83

Terminologia

3D	3 Dimensões
A	amplitude da onda
$A_{SecBobine}$	área da secção da bobine
A_{SecFio}	área da secção do fio
A_{sup}	área da superfície
α	coeficiente de acoplamento eletromecânico
C	coeficiente de amortecimento
B	campo magnético
C_I	coeficiente de inércia
C_m	coeficiente de massa hidrodinâmico
i	corrente elétrica
D_{cil}	diâmetro da base do cilindro
ρ_{corpo}	densidade do corpo
ρ_{fluido}	densidade do fluido
ρ	densidade de impressão
ρ_{mar}	densidade da água do mar
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
e	espessura
ε	força eletromotriz
ζ	elevação da superfície da água
EMEC	European Marine Energy Center
F_D	força dinâmica
F_H	força de resistência hidráulica
F_I	força de impulsão
F_P	peso
w	frequência angular
g	aceleração da gravidade
h	deslocamento vertical
h_0	altura submersa inicial
H_s	altura significativa das ondas
$h_{submersa}$	altura submerso do corpo no fluido
h_{total}	altura total
IEA	International Energy Agency
KC	número de Keulegan-Carpenter
L_{bobina}	indutância da bobine
l_{bobine}	comprimento da bobine
\bar{L}_{curso}	comprimento médio de curso
$L_{CursoMax}$	curso máximo
$L_{CursoMin}$	curso mínimo
m_{corpo}	massa do corpo
m_{desl}	massa de fluido deslocado
m_{fluido}	massa do fluido
N	número de espiras
OES	Ocean Energy Systems

ONU	Organização das Nações Unidas
PE-HD	Poliétileno de Alta Densidade Extrudido
μ	permeabilidade do núcleo
PLA	Poliácido Láctico
\bar{P}	potência média
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
$\bar{P}_{plataforma}$	potência média total gerada pela plataforma por unidade de área
PVC	Policloreto de Vinila
R	resistência elétrica do fio
ρ_{elect}	resistividade elétrica
R_i	resistência interna
R_l	resistência de carga
S	área da superfície inferior
T_e	período da onda
t	tempo
\bar{U}	tensão média
V_{desl}	volume de fluido deslocado por um corpo
$\dot{\eta}$	velocidade do módulo
\dot{u}	velocidade relativa entre um corpo e as partículas de um fluido
W	aceleração vertical da água
WEC	Wave Energy Converter
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Lista de Tabelas

3.1	Estado atual dos dispositivos conversores de energia estudados neste capítulo.	29
4.1	Esboços e descrição dos primeiros conceitos desenvolvidos.	32
4.2	Densidades dos materiais definidos para construção do protótipo.	41
4.3	Características mássicas e volúmicas dos componentes necessárias ao cálculos das densidades médias dos dois conjuntos de componentes que constituem o protótipo.	41
4.4	Tabela resumo dos materiais e componentes adquiridos para a construção do protótipo e componentes finais maquinados.	43
4.5	Valores utilizados nos cálculos da resistência do fio e indução magnética, para os diferentes diâmetros de fio de cobre existentes no mercado.	45
4.6	Valores de altura e comprimento de onda nos vários instantes estudados, e valores médios calculados.	49
5.1	Valores corrigidos da massa e densidade do módulo, de acordo com as alterações feitas a partir das simulações teóricas e erros funcionais nos ensaios.	56
5.2	Constantes utilizadas na simulação numérica do módulo.	56
5.3	Valores médios dos resultados numéricos para os dois perfis de ondas de teste.	58
6.1	Valores médios dos resultados experimentais.	68

Lista de Figuras

1.1	Contributo percentual das energias renováveis no consumo bruto de energia em Portugal. Dados retirados da Direção Geral de Energia e Geologia [1].	2
1.2	Estatísticas do contributo das energias renováveis na produção da energia elétrica em Portugal. Adaptado da DGE [1].	2
2.1	Densidade de potência anual em mares e oceanos. Adaptado de <i>Green Energy and Technology</i> [3].	5
2.2	Mapa do território português marítimo, incluindo a ZEE e a proposta de extensão da plataforma continental. Adptado de <i>Jornal Público</i> [5].	6
2.3	Localização das boias ondográficas em Portugal. Adaptado de <i>Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa</i> [6].	7
2.4	Densidade de potência anual nas zonas costeiras. Adaptado de <i>Assessing the Global Wave Energy Potential</i> [9].	8
3.1	Esquema das possíveis fases de conversão de energia das ondas. Adaptado de <i>The Study on Technology of Ocean Wave Energy Generation</i> [10].	9
3.2	Esquema das possíveis fases de geração de energia. Adaptado de <i>Handbook of Ocean Wave Energy</i> [12].	10
3.3	Ilustração dos componentes de um Pelamis e parque de ondas em Portugal.	12
3.4	Ilustração do sistema StingRAY, desenvolvido pela Columbia Power Technologies.	12
3.5	Ilustração dos sistemas desenvolvidos pela Eco Wave Power.	13
3.6	Central comercial instalada em Gibraltar em 2016. Adaptado de <i>Eco Power Wave</i> [21].	13
3.7	Ilustração dos sistemas desenvolvidos pela <i>Wave Star Energy</i>	14
3.9	Ilustração dos componentes e protótipo do Eagle WEC.	15
3.10	Esquema dos componentes básicos de um CETO. Adaptada de <i>Power Technology</i> [30].	16
3.11	Registo do PowerBuoy40 na costa do Hawaii em 2010. Adaptado de <i>Wave Energy Conversion</i> [32].	17
3.12	Ilustração dos componentes de um Searaser. Adaptado de <i>The Engineer</i> [34].	17
3.13	Ilustração de uma planta Potoon Power Converter. Adaptado de <i>Marintek Review</i> [35].	18
3.14	Ilustrações do sistema desenvolvido por Fred Olsen.	18
3.15	Ilustração de um WaveRoller. Adaptado de <i>AW Energy</i> [40].	19

3.16	Ilustrações do sistema desenvolvido pela BioPower.	19
3.17	Ilustração de um Langlee Wave Converter. Adaptado de <i>Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter</i> [44].	20
3.18	Ilustrações da Planta do Pico implementada em Portugal.	21
3.19	Esquema de um WaveCat. Adaptado de <i>The new wave energy converter WaveCat</i> [47].	21
3.20	Ilustração da disposição dos componentes de um Wave Dragon. Adaptado de <i>Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon</i> [50].	22
3.21	Registo do protótipo Wave Dragon na costa da Dinamarca. Adaptado de <i>Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon</i> [50].	22
3.22	Ilustração de slot-cone com três reservatórios. Adaptado de <i>Nature and magnitude of wave loadings at Seawave Slot-cone Generators</i> [52].	23
3.23	Ilustração de um dispositivo mWave. Adaptado de <i>Marine Energy</i> [55].	23
3.24	Ilustração de uma planta de Anacondas. Adaptado de <i>Checkmate Sea Energy</i> [59].	24
3.25	Ilustração de um SEAREV e protótipo de testes.	25
3.26	Ilustração e protótipo do ISWEC nos vários estágios de desenvolvimento.	26
3.27	Ilustração e registo do Penguin.	26
3.28	Mecanismo WITT e adaptação do mecanismo à energia de ondas.	27
3.29	Ilustração de um Uppsala WEC e transporte do Uppsala WEC L9.	27
3.30	Ilustração de um WEPTOS WEC. Adaptado de <i>The extensive R&D behind the Weptos WEC</i> [72].	28
4.1	Ilustração dos esboços da melhoria do primeiro conceito desenvolvido.	33
4.2	Ilustração dos esboços da melhoria do terceiro conceito desenvolvido.	33
4.3	Ilustração dos esboços do conceito do giroscópio, reformulado com dois eixos de rotação.	33
4.4	Ilustração dos esboços do conceito do giroscópio, reformulado com bobines fixas às laterais.	34
4.5	Ilustração dos esboços do conceito da massa livre.	34
4.6	Ilustração dos esboços do conceito da plataforma flutuante.	35
4.7	Esquemas da vista de cima e lateral da plataforma com distribuição das cavidades e respetivas boias alinhadas (a) e intercaladas (b).	36
4.8	Esboço da primeira proposta para protótipo em vista de corte, com as bobines representadas a laranja e os ímans a cinzento.	37
4.9	Esboço da segunda proposta para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobines, a cinzento os ímans e a preto estão representados os vedantes.	38
4.10	Esboço da terceira proposta para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobines e a cinzento os ímans.	38
4.11	Esboço da proposta final para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobines e a cinzento os ímans.	39
4.12	Esquema dos constituintes de um módulo do protótipo.	39
4.13	Imagens do tubo utilizado para bobinar e do tubo bobinado de acordo com o projeto.	44
4.14	Ilustração do aquário e respetivas dimensões (em mm).	46
4.15	Esboços de possíveis mecanismos de geração de ondas num tanque de testes.	46
4.16	Projeto do mecanismo de geração de ondas.	47

4.17	Exemplo de uma superfície de água em estudo.	47
4.18	Esquema representativo da marcação dos pontos e das dimensões da zona de estudo do tanque.	48
4.19	Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 1 segundo.	48
4.20	Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 0,5 segundos, desde o início de geração até 7 segundos.	48
4.21	Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 1 segundos, até ao final da geração.	48
5.1	Dimensões dos ímanes disponíveis para utilização no protótipo.	51
5.2	Resultados da simulação do campo magnético gerado para os três primeiros casos de estudo.	52
5.3	Gráficos dos valores de campo magnético na zona da bobina ao longo do comprimento dos ímanes e respetivos campos médios.	53
5.4	Distribuição do campo magnético gerado pelos dois ímanes.	53
5.5	Gráfico dos valores de campo magnético gerado pelos dois ímanes na zona de estudo.	54
5.6	Esquema das forças que atuam no módulo.	54
5.7	Gráfico da posição do módulo simulada numericamente para uma onda sinusoidal de 1 s de período e 20 mm de altura.	57
5.8	Gráfico da posição do módulo simulada numericamente para ondas sinusoidais de 0,5 s de período e 18,89 mm de altura.	57
5.9	Gráfico dos resultados da simulação da tensão e potência de um módulo para ondas sinusoidais de 1 s de período e 20 mm de altura.	57
5.10	Gráfico dos resultados da simulação da tensão e potência de um módulo para ondas sinusoidais de 0,5 s de período e 18,89 mm de altura.	58
6.1	Ilustração das várias boias com indicação das diferentes espessuras e densidades.	59
6.2	Ilustração do módulo com a boia de poliestireno expandido.	60
6.3	Imagem do protótipo adernado após introdução das boias de poliestireno extrudido.	60
6.4	Ilustração da numeração dos módulos para os testes do protótipo com as placas de poliestireno.	61
6.5	Imagens do comportamento do protótipo em testes com diferentes tamanhos de onda.	62
6.6	Ilustração do protótipo apoiado nos suportes roscados.	62
6.7	Imagens do comportamento do protótipo em testes com ondas de maior período (aproximadamente 1 segundo).	62
6.8	Imagens do comportamento do protótipo em testes com ondas de menor período (aproximadamente 0,5 segundos).	63
6.9	Imagem de um instante de teste da plataforma com orientação diferente à direção das ondas.	63
6.10	Imagens da estação de testes.	64
6.11	Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 1 durante o primeiro teste.	65

6.12	Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 1 durante o primeiro teste.	65
6.13	Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 3 durante o segundo teste.	66
6.14	Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 3 durante o segundo teste.	66
6.15	Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 6 durante o terceiro teste da plataforma com apoios.	66
6.16	Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 6 durante o terceiro teste.	67
6.17	Gráfico dos valores lidos da posição do módulo 6 na plataforma livre com placas de poliestireno.	67
6.18	Gráfico dos valores lidos da tensão do módulo 6 durante o teste do protótipo livre.	67
6.19	Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 6 durante o teste do protótipo livre.	68
8.1	Proposta de nova configuração da plataforma e incorporação das bobines.	71
A.1	Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Leixões (oceânica) na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019	79
A.2	Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Sines na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.	80
A.3	Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Faro (costeira) na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.	80
A.4	Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada no Caniçal na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.	81
A.5	Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada no Pico no dia 15 de Abril de 2019.	81

Capítulo 1

Introdução

Atualmente a energia é um fator com grande impacto em diversos temas relativos à sociedade em que vivemos, desde a economia à sustentabilidade. Dependendo dos recursos energéticos utilizados para obter a energia, esta pode ter um impacto significativamente negativo a nível ambiental, nomeadamente os combustíveis fósseis. Para além destes combustíveis serem, no geral, bastante poluentes na sua obtenção e utilização, estes recursos não são renováveis e estão a esgotar-se rapidamente. Em contrapartida, nos últimos anos tem-se registado um aumento no consumo de energia. De forma a que as necessidades sejam correspondidas, o recurso às energias renováveis é necessário.

1.1 Contextualização

Em Portugal, o consumo bruto de energia tem vindo a aumentar ligeiramente desde 2014, como mostra a o gráfico da figura 1.1. O contributo de energias renováveis na energia consumida também tem aumentado mas ainda abaixo do seu potencial. Em Portugal, no ano de 2004, apenas 19.2% da energia consumida provinha de energias renováveis, sendo que em 2015 se tratava de 28%. De 2015 a 2016, o consumo de energias renováveis aumentou apenas 0,5% [1]. No gráfico da figura 1.1 apresentam-se os objetivos nacionais para o contributo da energia renovável no consumo bruto de energia. Verifica-se que o valor real do contributo se tem aproximado do proposto nos objetivos, estando ainda distante de um contributo de 31% (objetivo proposto para o ano de 2020) [2].

No gráfico da figura 1.2a analisa-se o contributo da energia elétrica no consumo total de energia em Portugal. Desde 2010 o consumo de energia tem diminuído, sendo que a energia elétrica mantém-se uma parte significativa deste consumo. Em 2017 o consumo de energia elétrica era 25,7% do consumo de energia total, sendo que, 42,5% desta energia provinha de energias renováveis. No gráfico da figura 1.2b apresenta-se a evolução do contributo das diferentes energias renováveis na produção de eletricidade em Portugal. Ao longo dos anos, a energia hídrica e eólica tem um maior impacto na produção de energia elétrica do que as restantes energias. Desde 2009, a energia fotovoltaica exhibe um ligeiro crescimento, enquanto a energia proveniente dos resíduos sólidos urbanos, do biogás e geotérmica permanecem praticamente constantes.

A energia das ondas e marés não se encontra presente nos gráficos da figura 1.2 pois não se encontra ainda comercializada, não só em Portugal mas em todo o mundo.

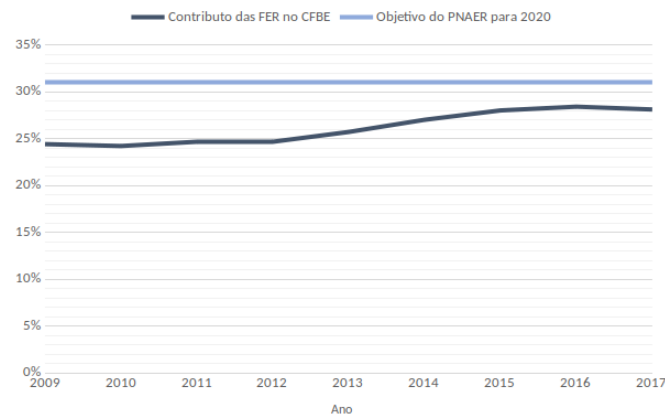
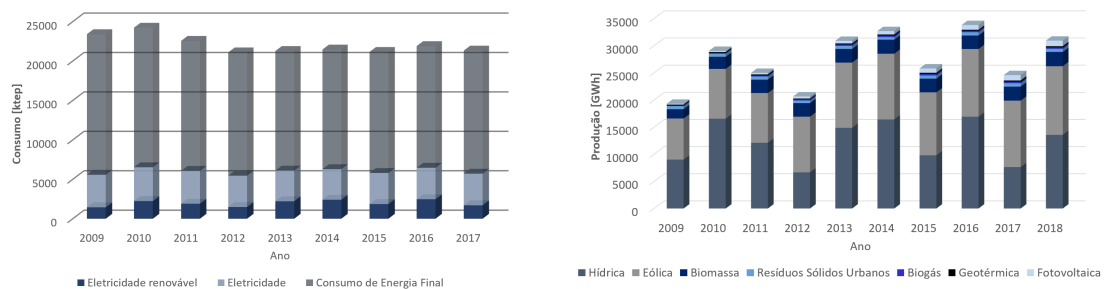


Figura 1.1: Contributo percentual das energias renováveis no consumo bruto de energia em Portugal. Dados retirados da Direção Geral de Energia e Geologia [1].



(a) Contributo do consumo de eletricidade (renovável e não renovável) no consumo de energia total (ktep).

(b) Produção de eletricidade por energia renovável em Portugal (GWh).

Figura 1.2: Estatísticas do contributo das energias renováveis na produção da energia elétrica em Portugal. Adaptado da DGE [1].

No entanto, Portugal tem um grande potencial para aproveitamento desta energia (ver capítulo O Recurso da Energia das Ondas). Para além disso, este recurso faz parte dos objetivos definidos para 2020 pelo PNAER. Nestes objetivos, no sector da energia das ondas, prevê-se o desenvolvimento das condições de ligação à rede para futuros projetos na zona de São Pedro de Moel. Na zona-piloto pretende-se a instalação de 250 MW até 2020. A aposta nesta energia renovável pode trazer uma grande vantagem a Portugal para o cumprimento dos seus objetivos, assim como a rentabilização na produção de energia [2].

1.2 Objetivos

O presente trabalho pretende estudar e analisar criticamente os mecanismos de extração da energia do movimento do mar existentes e apresentar novos conceitos. Estes devem ter em conta as falhas detetadas nos mecanismos já desenvolvidos e inovar no sentido de corrigir alguns dos maiores problemas detetados a nível da extração da energia do mar. Antes de se idealizarem os conceitos, deve-se fazer um estudo ao meio

marítimo, de forma a entender o potencial deste recurso e assim melhorar a extração de energia do mesmo, mas também entender os seus riscos e limitações para o projeto. Os conceitos apresentados devem gerar energia com base no princípio da indução magnética, evitando assim sistemas mecânicos mais complexos e elevada manutenção.

As propostas devem ser avaliadas segundo critérios que se achem adequados após a pesquisa sobre trabalhos já desenvolvidos. A proposta que apresentar maior potencial, de acordo com estes critérios, será prototipada e testada em ambiente aquático. O protótipo desenvolvido deve provar que o conceito gera energia.

Capítulo 2

O Recurso da Energia das Ondas

Na origem da formação das ondas encontram-se os ventos, enquanto as marés são formadas pela ação da lua e do sol. O vento que incide sobre a superfície dos oceanos gera ligeiras perturbações na água, as quais progridem em tamanho se o vento continuar a incidir. O tamanho das ondas estagna num certo limite devido a perdas de energia, e considera-se que a onda está completamente desenvolvida. Após a onda ser formada, ela pode continuar a propagar-se durante um tempo, mesmo que o vento deixe de incidir. Por esta razão podem-se considerar dois tipos de ondas: as ondas geradas por ventos ainda existentes e ondas geradas por ventos que já não as afetam. As ondas são movimentos de partículas da água que são transmitidos não só ao nível da superfície, mas que se estendem ao longo da coluna de água. Quanto maior a profundidade mais o movimento se aproxima a um movimento circular, enquanto que na superfície se trata de uma movimento elíptico. Em águas mais profundas, não existe movimento horizontal das partículas. Conhecer estas características das águas é importante para o desenvolvimento de mecanismos de aproveitamento de energia das ondas [3]. Para além do desenvolvimento dos mecanismos, conhecer as características do mar e saber a melhor localização para introduzir o dispositivo é crucial no seu desenvolvimento. Na figura 2.1 apresenta-se a capacidade de energia proveniente de ondas de cada local a nível mundial.

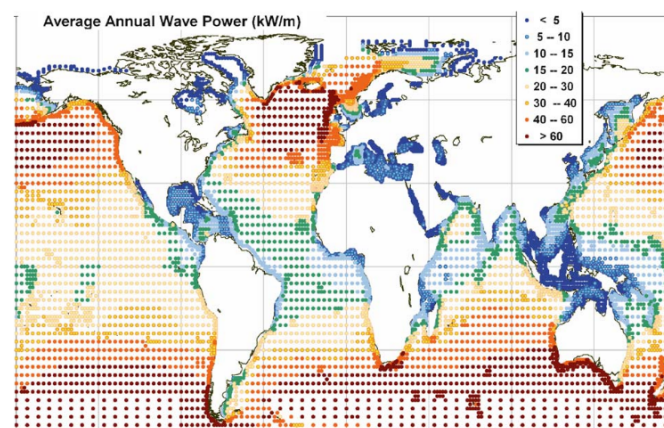


Figura 2.1: Densidade de potência anual em mares e oceanos. Adaptado de *Green Energy and Technology* [3].

2.1 A Costa Portuguesa

Portugal está localizado na costa ocidental da Península Ibérica, sobre uma placa que separa o Oceano Atlântico do Mar Mediterrâneo, sendo que o seu território marítimo encontra-se todo na zona do Oceano Atlântico. Atualmente, a ZEE portuguesa é constituída por três subáreas: a subárea do continente com $287\,521\text{ km}^2$, a subárea dos Açores com $930\,687\text{ km}^2$ e a subárea da Madeira composta por $442\,248\text{ km}^2$ de território, como ilustra a figura 2.2. Para além da ZEE, Portugal detém ainda de território na plataforma continental, muito superior à ZEE em dimensão [4]. Em 2009, surgiu a proposta de extensão da costa portuguesa, por parte de Portugal à ONU, na qual 97% do país é mar [5]. No entanto, o poder sobre a plataforma não é o mesmo que o poder sobre a ZEE, ambas ilustradas na figura 2.2. No caso da plataforma continental, Portugal apenas poderá usufruir dos recursos presentes no solo e subsolo, e não tem controlo sobre a coluna de água e respetivos recursos, como tem na ZEE [4].

De forma a monitorizar o estado do mar, o Instituto Hidrográfico da marinha portuguesa detém de uma rede de boias ondográficas, que permitem medir agitação marítima e temperatura superficial da água. Até à data, existem 15 boias ondográficas, das quais 4 são boias oceânicas e as restantes são boias costeiras [6]. Apenas 7 das 15 boias são continentais e, das 8 pertencentes aos arquipélagos, 5 fazem parte do arquipélago dos Açores e 3 do arquipélago da Madeira, como ilustra a figura 2.3.

De forma a ilustrar as condições do mar português, analisam-se a seguir os valores de altura significativa das ondas, período médio e direção das ondas, medidos por algumas das boias mencionadas acima. A altura significativa corresponde à média das três maiores alturas medidas no período em questão, e o período médio trata da média de todos os períodos durante o intervalo de tempo. A direção das ondas é medida relativamente ao norte, em graus, no sentido dos ponteiros do relógio, para o período máximo no intervalo de tempo de registo. As boias escolhidas para estudo são: Leixões oceânica, Sines, Faro costeira, Caniçal e Pico. As primeiras quatro são da responsabilidade do instituto da marinha portuguesa, e os valores lidos correspondem a valores obtidos durante a semana de 28 de Fevereiro de 2019 a 7 de Março de 2019, cujos gráficos se encontram no Anexo A. A boia do Pico é controlada pela Universidade dos Açores, e apenas se encontram

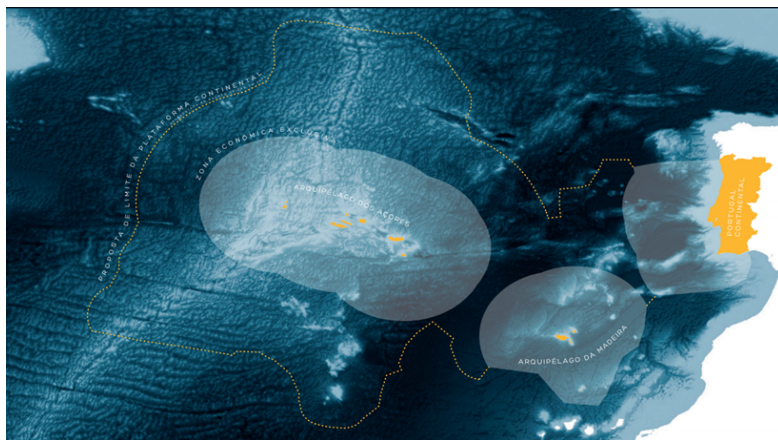


Figura 2.2: Mapa do território português marítimo, incluindo a ZEE e a proposta de extensão da plataforma continental. Adaptado de *Jornal Público* [5].

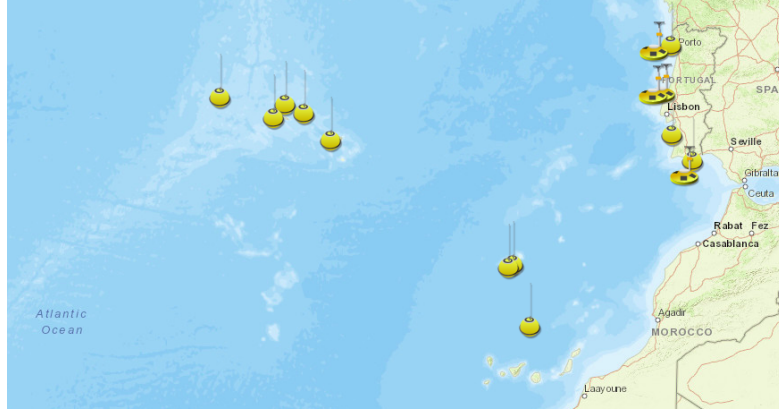


Figura 2.3: Localização das boias ondográficas em Portugal. Adaptado de *Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa* [6].

disponíveis os dados relativos ao dia 15 de Abril de 2019.

Relativamente à altura significativa das ondas, Leixões apresenta valores bastante mais elevados de forma mais constante, com altura significativa máxima de 6.9 m. De seguida, Sines apresenta uma altura significativa máxima de 3.9 m, superior a Faro e Caniçal com 2.35 m e 1.31 m, respetivamente. Relativamente à boia do Pico, registou-se uma altura significativa máxima de 3.9 m, aproximadamente. No caso do período médio, o menor período médio de onda registou-se no Caniçal (3.1 s) e o maior em Sines (12.7 s), sendo o Caniçal a zona com períodos de valores mais regulares. Leixões não difere muito do Caniçal no período médio, com valores mínimos ligeiramente superiores. No caso do Pico no dia dos registos, todos os períodos médios foram superiores a 6 s. A direção das ondas é mais estável na zona de Leixões, quase constante ao longo de vários dias, com valores entre 280° e 310° relativos ao norte. O Caniçal apresenta um maior intervalo de dispersão ao longo dos dias, entre 25° e 224° . Com os valores de período médio e altura significativa é possível ter uma ideia do potencial da costa portuguesa para aproveitamento da energia das ondas de acordo com a densidade de potência de uma onda. Este valor pode ser calculado recorrendo à aproximação de *deep water energy flux*, representada na equação 2.1, onde ρ_{mar} é a densidade da água do mar, g é a aceleração da gravidade, T_e é o período e H_s é a altura significativa. Pela equação 2.1 mostra-se que, quanto maior o período e a altura significativa, maior será a potência por unidade de comprimento da altura máxima da onda. Com base nos dados apresentados da semana de 28 de Fevereiro a 7 de Março, pode-se concluir que Leixões tem um maior potencial para aproveitamento da energia das ondas, devido ao maior período e altura significativa.

$$P_w = \frac{\rho_{mar} \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \cdot T_e \cdot H_s^2 \quad (2.1)$$

Ao longo dos anos foram feitos vários estudos sobre a costa portuguesa e o seu potencial para gerar energia a partir das ondas. Dina Silva et al [7], avaliaram a densidade de potência na Aguçadoura, Figueira da Foz, São Pedro de Moel, Peniche, Cascais e Sines, com valores simulados desde 1979 até Julho de 2012, recorrendo à mesma expressão 2.1. Concluíram que a Aguçadoura ou São Pedro de Moel teriam um melhor aproveitamento da energia, dependendo da capacidade dos dispositivos utilizados e que, quanto mais

afastado da costa o dispositivo, maior seria o aproveitamento. Paulo Mota e Paulo Pinto [8] também concluíram que o norte do país era mais propício ao aproveitamento da energia das ondas do que a costa a sul. Isto está de acordo com o facto da direção principal da corrente do Golfo (corrente principal do Oceano Atlântico) provir do nordeste, o que implica que cheguem com maior intensidade ao norte de Portugal.

Numa perspetiva da costa mundial, em 2010 foi realizado um estudo por Gunnar Mork et al [9], sobre todos os continentes e as suas costas. Os resultados relativos à densidade de potência anual apresentam-se na figura 2.4. Comparativamente a outros países, Portugal tem uma boa zona costeira para aproveitamento da energia das ondas, juntamente com as zonas mais a sul da América do Sul, zonas a sul de África e de Oceania, e países a norte da Europa.

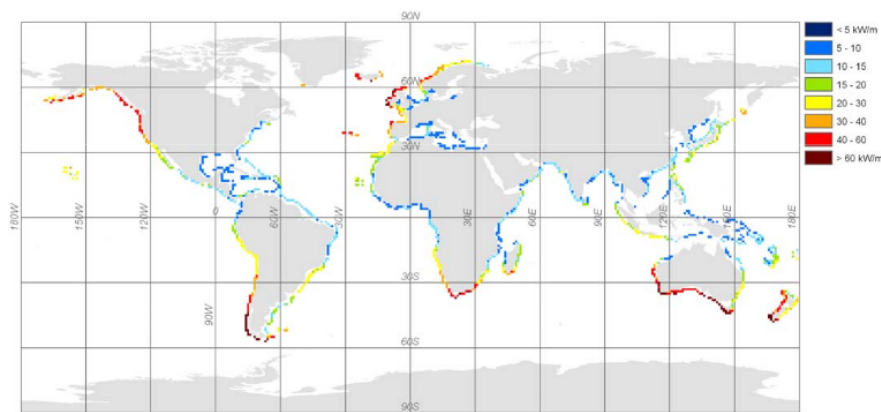


Figura 2.4: Densidade de potência anual nas zonas costeiras. Adaptado de Assessing the Global Wave Energy Potential [9].

Capítulo 3

Revisão do Estado da Arte

Na atualidade existe uma grande variedade de mecanismos de extração de energia das ondas, com princípios de funcionamento bastante diferentes entre si. Segundo a EMEC, em Fevereiro de 2017 existiam 227 companhias a desenvolver dispositivos cujo objetivo será retirar energia das ondas.

3.1 Geradores Utilizados na Conversão de Energia das Ondas

Considera-se que a energia das ondas tem duas componentes de energia para aproveitamento: a energia potencial e a energia cinética. No entanto, é possível considerar ainda uma energia do desnível de água. De forma a converter estas energias em energia elétrica que alimente a rede de abastecimento de populações, pode ser necessário passar por vários níveis de conversão. Dependendo do dispositivo, alguns podem ter até três níveis de conversão, como ilustra o diagrama da figura 3.1. Com o aumento dos níveis de conversão e respetivos mecanismos, aumenta a possibilidade de desgaste dos componentes assim como perdas de energia ao longo do processo, o que diminui a eficiência do dispositivo [10]. Devido à ampla gama de frequências das ondas e as oscilações bastante aleatórias, a conversão desta energia em energia elétrica com apenas uma frequência torna-se ainda mais complexa [11].

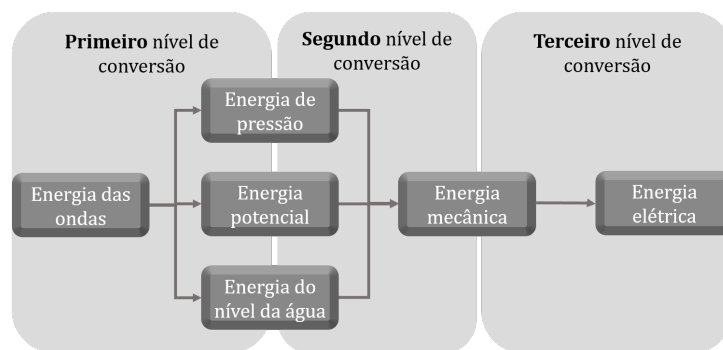


Figura 3.1: Esquema das possíveis fases de conversão de energia das ondas. Adaptado de *The Study on Technology of Ocean Wave Energy Generation* [10].

No geral, os geradores podem ser lineares ou rotacionais, sendo que uma grande parte dos dispositivos revistos no estado da arte contém geradores rotacionais. Independente de serem lineares ou rotacionais, a maioria dos geradores passa pelos três níveis de conversão, como mostra a figura 3.2. Os sistemas mecânicos de acionamento direto passam apenas por dois níveis de conversão: convertem a energia das ondas em energia mecânica, a qual é transformada em energia elétrica. No entanto, também estes sistemas mecânicos têm componentes sujeitos a desgaste. Os sistemas elétricos de acionamento direto convertem diretamente a energia das ondas em energia elétrica, o que reduz significativamente o número de componentes propícios à deterioração.

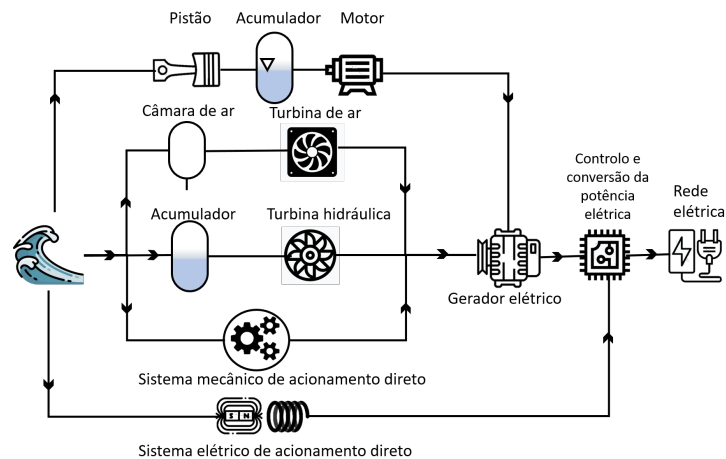


Figura 3.2: Esquema das possíveis fases de geração de energia. Adaptado de *Handbook of Ocean Wave Energy* [12].

3.2 Classificação dos Dispositivos

Devido à grande diversidade de dispositivos, a classificação dos mesmos pode ser feita de diferentes formas e variar de acordo com os autores. No geral os dispositivos podem classificar-se pela localização, tamanho e direção ou princípio de funcionamento [13].

De acordo com a localização, os dispositivos dividem-se em três diferentes tipos: localizados na costa, perto da costa ou em alto mar. Os mecanismos localizados na zona costeira podem estar posicionados em águas rasas, paredões ou penhascos. A proximidade da costa permite uma fácil instalação e manutenção, evita a necessidade de amarração assim como de grandes cabos que transportam a energia para a rede. Em contrapartida, as ondas costeiras apresentam menor potência devido à proximidade com o fundo, e suscitam problemas ambientais e de paisagem que impedem a sua produção em massa [14]. As zonas consideradas perto da zona costeira são, normalmente, zonas com profundidades entre 10 m e 25 m, apesar de não ser uma definição consensual na comunidade científica [13]. Os dispositivos que se encontram nestas zonas não têm necessariamente amarrações ao fundo. Por outro lado, como são ainda zonas de águas rasas a potência das ondas é ainda reduzida. Finalmente as zonas de alto mar são zonas oceânicas localizadas a mais de 40 m de profundidade. Estas zonas profundas apresentam maior potência nas ondas, sendo esta uma característica vantajosa em termos de energia

mas que implica um ambiente muito mais agressivo, o qual facilita a deteiorização dos mecanismos. O distanciamento da costa promove um aumento de custos e dificuldades na instalação e manutenção dos dispositivos, assim como um elevado comprimento de cabos para levar a energia até à rede pública [15].

Tendo em conta o tamanho e orientação do dispositivo em relação à direção das ondas, pode ser classificado como atenuador, terminador ou absorvedor pontual. Tanto os atenuadores como os terminadores são estruturas longas quando comparadas com o comprimento de onda. No caso dos atenuadores, o eixo principal encontra-se paralelo à direção das ondas e são, no geral, estruturas articuladas ou flexíveis. Os terminadores têm o seu eixo principal alinhado perpendicularmente à direção das ondas e pode ser uma estrutura articulada ou rígida. Se estes dois tipos de dispositivos não possuírem um sistema de amarração ao fundo que os mantenha na sua devida posição, um atenuador pode comportar-se como terminador e vice-versa [3]. Os absorvedores pontuais têm, geralmente, dimensões reduzidas relativamente ao comprimento de onda, as quais permitem aproveitar energia das ondas independentemente da direção das mesmas, convertendo energia dos movimentos verticais [15].

A classificação dos dispositivos de acordo com o princípio de funcionamento varia de acordo com as entidades. A Ocean Energy Systems (OES), entidade pertencente à International Energy Agency (IEA), define apenas três sistemas principais: colunas de água oscilante, corpos ativados pelas ondas e dispositivos de galgamento [12]. A European Marine Energy Center (EMEC) tem uma classificação mais detalhada, dividindo os dispositivos em oito tipos: atenuadores, absorvedores pontuais, conversores oscilantes de translação, colunas de água oscilante, dispositivos de galgamento, dispositivo submerso de diferença de pressão, dispositivo *bulge wave* e *rotation mass*. A EMEC considera ainda uma categoria para outros tipos de mecanismos, pois nem todos são abrangidos pelas características de um dos grupos mencionados. Seguidamente será feita uma análise mais detalhada de alguns exemplos com base nesta classificação.

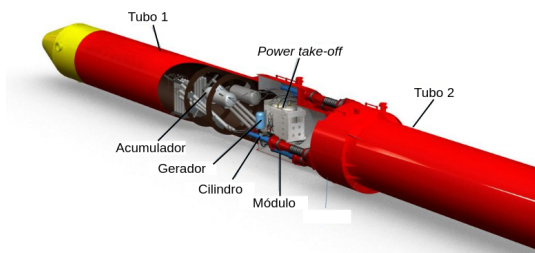
3.2.1 Atenuadores

Como referido anteriormente, os atenuadores são mecanismos longos, alinhados com o eixo principal paralelo à direção principal das ondas. Em Fevereiro de 2017 existiam 35 entidades a desenvolver este tipo de mecanismos.

Pelamis O Pelamis WEC começou a ser desenvolvido em 1998 pela empresa Pelamis Wave Power Ltd, em Edinburgo, Escócia. O mecanismo é composto por várias boias com formato cilíndrico, ligados por juntas com dois graus de liberdade. As boias tem o seu eixo principal orientado de acordo com a direção principal das ondas. Nas juntas existem cilindros hidráulicos que enviam fluido pressurizado como resultado do movimento relativo entre boias. Os motores hidráulicos dentro das boias cilíndricas são movidos pelo fluido pressurizado e, por sua vez, ativam geradores que geram a energia elétrica. De forma a manter o dispositivo orientado com a direção das ondas, são utilizados sistemas de amarração na ponta frontal [3].

Vários protótipos com diferentes escalas foram estudados. O protótipo com menor escala, 1:7, foi estudado na l'Ecole Centrale de Nantes, de forma a testar as juntas e circuitos hidráulicos. Em 2008, Portugal investiu 8,5 milhões de euros no primeiro parque de dispositivos conversores de energia das ondas em todo o mundo, ao que se deu o nome

de Parque de Ondas da Aguçadoura (local onde foi instalado), como mostra a figura 3.3b. No total, o parque tinha a capacidade de 2,25 MW com três dispositivos. Portugal planeava implantar mais 22 conversores, obtendo assim uma planta com capacidade de 21 MW [3]. No entanto, em 2009, os dispositivos foram retirados devido à grande quantidade de problemas técnicos, como vazamentos nos tanques, problemas de amarração e falta de financiamento [16].



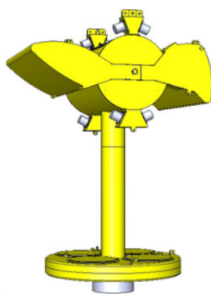
(a) Esquema dos componentes de dois cilindros de um Pelamis.



(b) Parque de Ondas da Aguçadoura, constituída por três Pelamis. Adaptado de *Wave energy utilization: A review of the technologies* [17].

Figura 3.3: Ilustração dos componentes de um Pelamis e parque de ondas em Portugal.

StingRAY O sistema StingRAY foi desenvolvido pela Columbia Power Technologies com o objetivo de aproveitar a energia das ondas em alto mar. O mecanismo decompõem-se em duas boias, uma frontal e uma à retaguarda, como se vê na figura 3.4a, cada uma conectada a um eixo e gerador diferentes. Esta característica permite que as boias funcionem de forma independente e a mecanismo se mova com as ondas, oferecendo assim uma maior proteção às condições agressivas do meio. O sistema pode gerar até 330 kW [18].



(a) Representação do mecanismo *StingRAY*. Adaptado de Columbia Power Technologies [19].

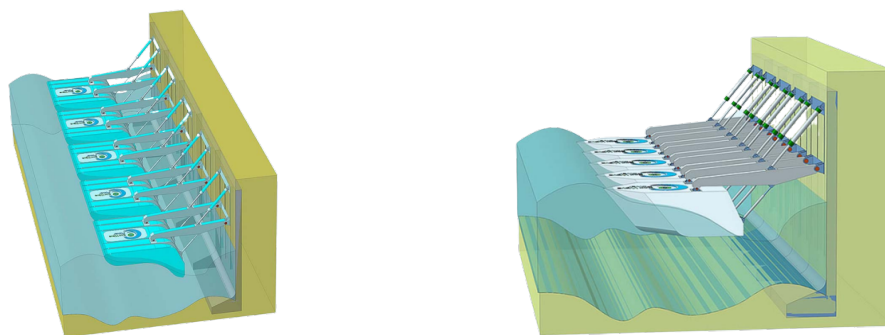


(b) Mecanismo *StingRAY* implementado no mar. Adaptado de Columbia Power Technologies [19].

Figura 3.4: Ilustração do sistema *StingRAY*, desenvolvido pela Columbia Power Technologies.

The Power Wing e The Wave Clapper As tecnologias Power Wing e Wave Clapper foram desenvolvidas por uma companhia denominada por Eco Wave Power situada em Israel. Ambos os sistemas são compostos por elementos flutuantes que acompanham o movimento das ondas perto da costa. O movimento destes elementos comprime um fluido num pistão e seguidamente descomprime-o, libertando energia. Esta energia é aproveitada para mover um motor hidráulico e posteriormente um motor elétrico. A estrutura à qual estes sistemas estão acoplados pode variar. Os elementos flutuantes são protegidos das condições desfavoráveis recorrendo a um sistema de submersão em caso de ondas elevadas [20].

Apesar de terem o mesmo princípio de funcionamento, as duas tecnologias diferem na forma dos elementos flutuantes. Na figura 3.5 é possível ver a forma de cada elemento flutuante em cada tecnologia, sendo que cada uma possui características que se adaptam melhor a diferentes ambientes [21].



(a) Ilustração de uma central de mecanismos Power Wing. Adaptado de *Eco Power Wave* [21].

(b) Ilustração de uma central de mecanismos Wave Clapper. Adaptado de *Eco Power Wave* [21].

Figura 3.5: Ilustração dos sistemas desenvolvidos pela Eco Wave Power.

Em Março de 2016 foi instalada a primeira central em Gibraltar com 100 kW de capacidade ligada à rede, como ilustra a figura 3.6, e será usada para testes, com intenção de comercializar energia até 2020 [20].



Figura 3.6: Central comercial instalada em Gibraltar em 2016. Adaptado de *Eco Power Wave* [21].

Wave Star Semelhante ao princípio de funcionamento do Power Wing e Wave Clapper, Niels and Keld Hansen desenvolveram o Wave Star, no entanto, este é um sistema

projetado para atuar em alto mar, contrariamente aos outros que atuam perto da costa. O sistema é composto por duas filas de boias alinhadas com a direção principal das ondas, razão pela qual a classificação deste mecanismo entre absorvedor pontual ou atenuador não seja consensual. Cada boia tem um formato hemisférico como mostra a figura 3.7a, e está conectada ao motor hidráulico principal que por sua vez ativa o gerador. Quando a boia se movimenta para cima o fluido é enviado na direção do motor e quando a boia se movimenta para baixo o fluido é libertado da saída do motor [22]. As boias estão conectadas a uma plataforma estática segura ao fundo do mar por pilares. Em 2009 um modelo em escala 1:2 foi instalado para testes em alto mar, com potência de 600 kW [23].



(a) Registo das boias hemisféricas de um Wave Star. Adaptado de Offshore Energy Structures [22].



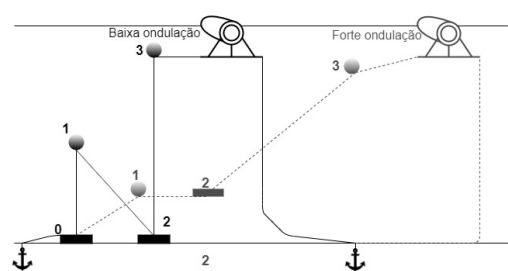
(b) Registo de um Wave Star. Adaptado de *The NumWEC Project* [24].

Figura 3.7: Ilustração dos sistemas desenvolvidos pela *Wave Star Energy*.

Floating Duck e Eagle Wave Energy Converter Os dispositivos Floating Duck e Eagle Wave Energy Converter foram desenvolvidos por um instituto chinês denominado GuangZhou Institute of Energy Conversion. O Floating Duck foi o primeiro a ser desenvolvido, sendo constituído por três componentes principais: um apêndice submerso, um eixo e um componente denominado por Duck, desenvolvido por Stephen Salter. O Duck acompanha o movimento das ondas, transformando este movimento em energia mecânica ao movimentar-se em torno do eixo. O apêndice submerso é composto por uma placa horizontal e outra vertical que permite estabilizar o mecanismo e, conseqüentemente, diminuir a força exercida pela amarração, ao mesmo tempo que favorece a eficiência de captação de energia pelo Duck. O sistema de amarração foi projetado de forma a resistir às fortes ondulações em alto mar, composto por duas boias e dois pesos. Um dos pesos é fixo ao fundo enquanto outro é dinâmico, permitindo que o mecanismo se adapte às ondas mais agressivas sem que o sistema de amarração rompa ou seja arrastado [25]. Na figura 3.8a é possível verificar uma representação do sistema de amarração no caso de baixa ondulação e forte ondulação.

Realizaram-se, até 2012, três testes em mar de mecanismos com potência de 10 kW. Em 2013 realizaram-se testes num mecanismo com 100 kW, como ilustra a figura 3.8b, cuja máxima potência de saída registada foi de 25 kW. Durante estes testes verificou-se que ainda existiam problemas com o sistema de amarração e a continuidade de energia convertida dependia da força das ondas. O elevado peso do mecanismo e inércia rotacional são outros problemas que estão ainda por resolver [26].

O dispositivo Eagle Wave Energy Converter, desenvolvido pelo mesmo instituto, foi

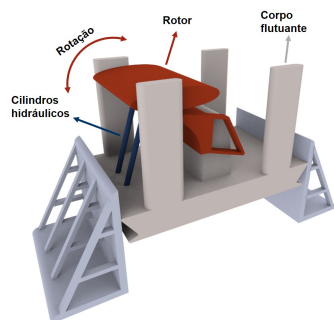


(a) Ilustração do sistema de amarração: 0: peso fixo; 1: boia frontal; 2: boia à retaguarda; 3: peso dinâmico. Adaptada de *Wave Energy Technology in China* [25].



(b) Ilustração do Floating Duck com 100 kW testado em ambiente marítimo. Adaptado de *Wave and Tidal Energy* [26].

inspirado no Floating Duck e assemelha-se a um navio submerso. O sistema tem quatro componentes principais: um corpo flutuante, cilindros hidráulicos, um rotor e um gerador. A figura 3.9a ilustra os diversos componentes e formatos esquematizados do Eagle. O formato do corpo flutuante semelhante a um bico, assim como o seu baixo peso, permitem gerar energia com poucas ondas. A estrutura submersa permite estabilizar o dispositivo [26]. No final de 2012 foi testado um *Eagle* com capacidade de 10 kW, mostrando-se bastante eficiente. Em 2015 e 2016 testou-se um *Eagle* com 100 kW de potência. Os resultados mostraram uma *capture width ratio* superior a 20% com períodos de onda entre 4 e 6,5 segundos [26].



(a) Esquema do Eagle WEC e seus componentes. Adaptado de *Ocean Engineering* [27].



(b) Ilustração do Eagle WEC 100 kW em funcionamento em ambiente marítimo. Adaptado de *Wave and Tidal Energy* [26].

Figura 3.9: Ilustração dos componentes e protótipo do Eagle WEC.

3.2.2 Absorvedores Pontuais

CETO CETO é um dispositivo desenvolvido pela Carnegie Clean Energy, uma empresa australiana. Trata-se de um sistema totalmente submerso, composto por uma boia conectada a um bomba hidráulica que envia água a elevadas pressões para a costa, utilizando o movimento das ondas para mover a boia e consequentemente a bomba. Os componentes do sistema encontram-se ilustrados na figura 3.10. Na costa, a água passa por turbinas que geram energia, assim como processos de dessalinização, que produzem água potável. A produção de água potável traz uma vantagem a este sistema

comparativamente a outros processos de obtenção de energia das ondas. Para além da energia gerada pela água pressurizada em terra, o CETO contém geradores dentro da própria boia que permitem gerar energia no local [28]. O facto de estar totalmente submerso concede proteção de condições adversas como tempestades.

Vários modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos. O CETO 5 tinha uma potência de 240 kW enquanto o CETO 6 tem uma capacidade de 1 MW, sendo este o modelo mais recente [29].

Existem outros sistemas com o mesmo princípio de funcionamento: enviar água para a costa através de bombas, como é o caso do Seadog desenvolvido pela Independent Natural Resources.

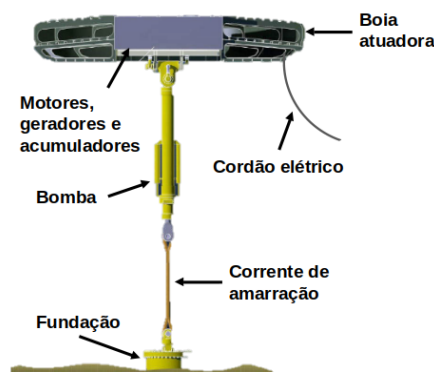


Figura 3.10: Esquema dos componentes básicos de um CETO. Adaptada de *Power Technology* [30].

PowerBuoy O PowerBuoy foi desenvolvido pela Ocean Power Technologies. Entre os seus componentes está uma estrutura cilíndrica estática com movimento relativo a uma boia que acompanha o movimento das ondas. O movimento relativo destes componentes ativa o gerador. A energia gerada é enviada para a rede elétrica através de cabos submersos que ligam os dispositivos à costa [31].

Os primeiros PowerBuoy's testados possuíam uma capacidade de 40 kW (PB40) e foram testados na costa de New Jersey entre 2005 e 2008 (figura 3.11). Em 2008 foram testados durante um mês em Espanha e no Hawaii entre 2009 e 2011. Em 2011 foi instalado um PowerBuoy com capacidade de 150 kW (PB150) nos Estados Unidos e em 2016 desenvolveu-se uma versão pré comercial de um sistema com 3 kW (PB3) [32].

Searaser O dispositivo Searaser foi desenvolvido por Alvin Smith, um engenheiro de Dartmouth, e adquirido pela empresa Ecotricity. O princípio de funcionamento é semelhante ao CETO, enviando água para a costa de forma a produzir energia. A água é enviada para a costa por ação de um pistão que se encontra entre duas boias, uma à superfície e outra submersa, ancorada ao fundo, como ilustra a figura 3.12. Quando chega a costa a água alimenta uma turbina ligada a um gerador [33]. No ano de 2010 este mecanismo tinha uma potência de saída de 100 kW, com o objetivo de atingir a potência de 1 MW [34].



Figura 3.11: Registro do PowerBuoy40 na costa do Hawaii em 2010. Adaptado de *Wave Energy Conversion* [32].

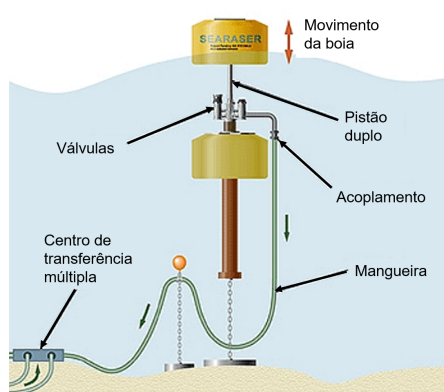


Figura 3.12: Ilustração dos componentes de um Searaser. Adaptado de *The Engineer* [34].

Pontoon Power Converter O Pontoon Power Converter é um sistema projetado pela empresa Pontoon Power AS. Tal como o CETO ou o PowerBuoy, este sistema também se baseia no envio de água por pressão através de bombas ativadas pelo movimento das boias. No entanto o Pontoon Power Converter não se baseia apenas numa boia mas no conjunto de várias. Cada boia está associada a uma bomba que envia água para o dispositivo central e não para a costa, contrariamente aos anteriores. No dispositivo central a água faz mover uma turbina associada a um gerador. A energia gerada é enviada para costa através de cabos. Todas as boias estão conectadas por uma estrutura ligada a quatro pesos de forma a equilibrar o sistema. O sistema mantém a sua posição através de amarração ao fundo do mar, conectada ao dispositivo principal. De forma a proteger de tempestades, todo o sistema fica submerso quando necessário [35].

Lifesaver Desenvolvido por Fred Olsen, o mecanismo Lifesaver foi projetado com o intuito de retirar energia das ondas. O mecanismo é composto por cabos presos ao fundo do mar e ligados a engrenagens na boia. A boia possui um gerador o qual é ativado pelo movimento dos cabos os quais se movimentam de acordo com o movimento das ondas [36]. Uma das desvantagens deste mecanismo é a atuação do gerador como motor para

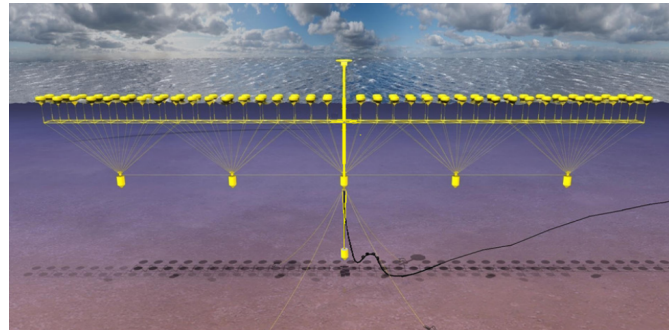


Figura 3.13: Ilustração de uma planta Potoon Power Converter. Adaptado de *Marintek Review* [35].

repor os cabos na posição inicial, reduzindo a eficiência do sistema [37].

Em 2012 instalou-se em Falmouth um *Lifesaver* com potência de 315 kW. Em 2016 foi movido para o Hawaii durante um ano, onde demonstrou algumas falhas técnicas possíveis de reparar, e uma capacidade de gerar energia por períodos de tempo superiores a seis meses [32].

Atualmente existem outros mecanimos que utilizam movimentos relativos de cabos presos ao fundo para gerar energia, como o *Super Watt Wave Catcher Barges*, desenvolvido pela Marine Energy Corporation.



(a) Ilustração do Lifesaver. Adaptado de *Bolt Sea Power* [38].



(b) Lifesaver instalado no Hawaii em 2016. Adaptada de *NBC News* [36].

Figura 3.14: Ilustrações do sistema desenvolvido por Fred Olsen.

3.2.3 Conversores Oscilantes de Translação

Os conversores oscilantes de translação funcionam como um pêndulo que oscila consoante o movimento das partículas de água perto da costa, causado pelo movimento das ondas. Geralmente este tipo de dispositivos é composto por uma estrutura articulada perpendicular ao movimento das ondas [14].

WaveRoller O WaveRoller é um dispositivo projetado por uma empresa finlandesa denominada AW Energy. O sistema opera a uma distância da costa de 0.3 m a 2 m. Consiste numa placa ancorada ao fundo do mar que aproveita as condições das águas fundas perto da costa para fazer a placa oscilar, como ilustra a figura 3.15. O movimento

oscilante faz mover um pistão hidráulico que força um fluido num circuito hidráulico, que está situado no interior do WaveRoller. Tal como em vários dispositivos, o circuito hidráulico ativa um motor conectado a um gerador. A energia gerada é enviada para a rede elétrica na costa através de cabos submersos. Uma placa pode gerar entre 0.5 MW a 1 MW [22].

Em 2011 foi instalado em Peniche (Portugal) um sistema de WaveRoller's constituído por três placas, cada uma com 100 kW de capacidade, que permaneceu até 2013. Durante os testes verificou-se que o sistema conseguiu produzir 500 kWh em 24h com ondas de 2.5 m de altura [39].



Figura 3.15: Ilustração de um WaveRoller. Adaptado de AW Energy [40].

bioWAVE O dispositivo bioWAVE foi desenvolvido pela empresa australiana BioPower. O sistema tem o mesmo princípio de funcionamento que o WaveRoller, operando submerso perto da costa. A estrutura que oscila de acordo com o movimento das ondas é composta por três grandes alhetas acopladas a uma estrutura fixa ao fundo do mar. Os geradores rodam livremente para se adaptarem à direção das correntes. As alhetas podem alinhar-se paralelamente ao fundo do mar como forma de proteção em caso de tempestades. O mecanismo de geração de energia é hidráulico, tal como o WaveRoller [41].

Em 2012 deu-se início ao desenvolvimento de um bioWAVE de capacidade 250 kW, com vista a implementar na costa de Port Fairy na Austrália. O sistema foi implementado em Dezembro de 2015 apresentando alguns problemas em 2016 [42].



(a) Ilustração do bioWAVE. Adaptado de BPS Ocean Energy [43].



(b) bioWAVE no Port Fairy em 2015. Adaptado de Standard [42].

Figura 3.16: Ilustrações do sistema desenvolvido pela BioPower.

Langlee System O sistema Langlee foi inicialmente projetado em 2005 e está a ser desenvolvido pela Langlee Wave Power. É composto por várias placas articuladas, semelhante ao WaveRoller, no entanto este contém placas opostas colocadas simetricamente, tal como mostra a figura 3.17. Esta disposição permite diminuir as forças na estrutura e aproveitar melhor as ondas. As placas estão fixas a uma estrutura semi-submersa de alumínio que por sua vez está amarrada ao fundo do mar [44].

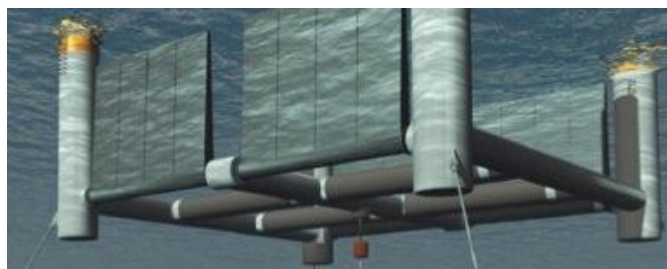


Figura 3.17: Ilustração de um Langlee Wave Converter. Adaptado de *Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter* [44].

3.2.4 Colunas de Água Oscilante

Os mecanismos denominados de colunas de água oscilantes são estruturas ocas parcialmente submersas, cujo nível de água aumenta com as ondas e diminui com o retorno da água ao mar (através de uma abertura abaixo do nível do mar). Este movimento da água causa compressão e descompressão de uma coluna de ar que circula ao longo de uma turbina, a qual gera energia [13].

Pico Em 1999 foi construída uma planta no Pico (Açores, Portugal) desenvolvida pela Universidade Técnica de Lisboa e com o apoio de entidades como a Comissão Europeia e a EDP (Eletricidade de Portugal) [3]. A planta encontra-se na costa num local com profundidade de 8 m (3.18a). A estrutura contém uma entrada submersa através da qual as ondas atravessam. O movimento das ondas no interior da estrutura controla uma coluna de água oscilante que funciona como um pistão para comprimir e descomprimir ar. O ar movimenta uma turbina Wells conectada a um gerador assíncrono que gera energia [45]. A figura 3.18b mostra uma representação dos componentes da planta. As turbinas têm 2.3 m de diâmetro e o sistema tem uma capacidade de 400 kW [3].

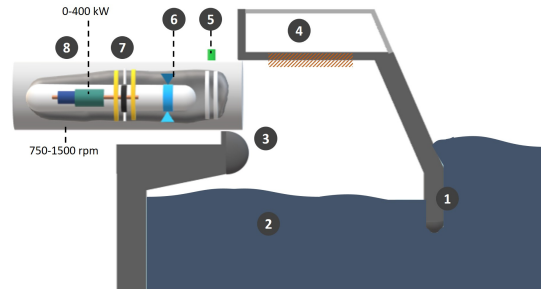
3.2.5 Dispositivos de Galgamento ou Terminadores

Os dispositivos de galgamento são dispositivos que levam a água a encher um reservatório que posteriormente retorna ao mar passando por uma turbina que aproveita a energia potencial.

WaveCat O dispositivo WaveCat foi desenvolvido pela Universidade de Santiago de Compostela em Espanha, com o objetivo de funcionar em alto mar com profundidades de 10 m a 50 m. O dispositivo tem dois limites laterais que convergem no sentido da direção principal das ondas. Como estão unidos por uma dobradiça, o ângulo formado



(a) Planta do Pico vista da costa. Adaptada de *Green Energy* [3].



(b) Esquema da planta do Pico. 1: onda incidente; 2: coluna de água; 3: câmara pneumática; 4: válvula de *by-pass*; 5: válvula de isolamento; 6: válvula de atuação; 7: turbina Wells; 8: gerador assíncrono. Adaptado de *Pico OWC* [46].

Figura 3.18: Ilustrações da Planta do Pico implementada em Portugal.

entre eles é variável entre 0° e 120° , e permite que se adaptem ao estado do mar. No caso de tempestade o ângulo retorna a 0° como forma de proteção. Na zona de convergência dos limites laterais estes são compostos por tanques que enchem com o galgamento das ondas. Estes tanques estão acima do nível médio da água e quando a água retorna ao mar passa por umas turbinas que aproveitam esta energia potencial [47]. O sistema tem duas amarrações conectadas a cada limite que convergem numa só amarração no fundo do mar, o que facilita que o dispositivo se oriente de acordo com a direção das ondas [48].

Até 2011 apenas protótipos foram desenvolvidos, como é exemplo um protótipo à escala 1:30 em testes, num tanque de ondas na Universidade do Porto. Para além dos modelos físicos, encontrava-se a ser desenvolvido um modelo numéricos 3D [47]. Recentemente desenvolveu-se um novo modelo físico na Universidade de Plymouth com a mesma escala do anterior. A máxima potência gerada neste modelo foi 71 kW, sendo que o valor varia muito consoante o período e altura das ondas. Com estes testes James Allen et al. concluíram que o dispositivo teria de ser melhorado para gerar energia de forma viável [49].

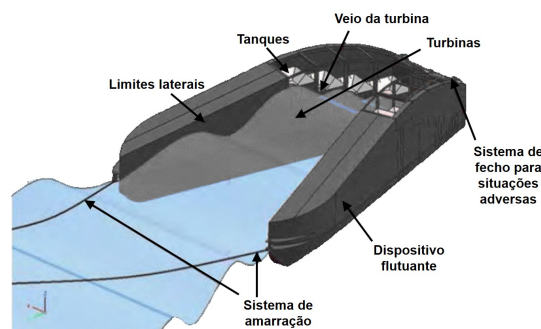


Figura 3.19: Esquema de um WaveCat. Adaptado de *The new wave energy converter WaveCat* [47].

Wave Dragon Desenvolvido por Erik Friis-Madsen, o Wave Dragon é um dispositivo projetado para atuar em alto mar. O sistema é composto por dois refletores, uma plataforma principal e turbinas Kaplan. Os refletores direcionam as ondas o que aumenta a altura das mesmas. Na plataforma principal existe uma rampa na direção das ondas e que facilita o galgamento das ondas para o reservatório, como indica a figura 3.20. A água é libertada por baixo do reservatório atravessando a turbina Kaplan que aproveita a energia potencial [50].

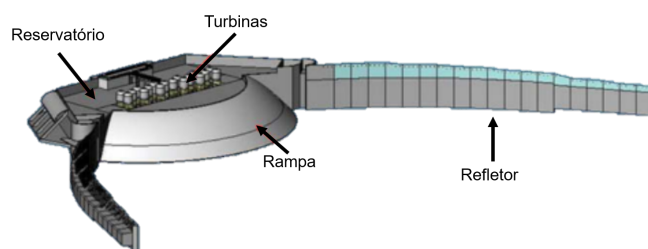


Figura 3.20: Ilustração da disposição dos componentes de um Wave Dragon. Adaptado de *Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon* [50].

Em 2003 um protótipo do Wave Dragon numa escala 1:4.5 foi instalado em Nisum Broads, norte da Dinamarca, numa zona com 6 m de profundidade [50]. Em 2013 estava a ser projetada uma versão pré-comercial de um Wave Dragon com capacidade de 1.5 MW, ilustrado na figura 3.21, para ser testada na costa da Dinamarca [51].



Figura 3.21: Registo do protótipo Wave Dragon na costa da Dinamarca. Adaptado de *Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon* [50].

Seawave Slot-Cone Generator (SSG) O SSG foi patenteado por uma empresa norueguesa denominada Wave Energy AS, fundada em 2004. O dispositivo é composto por vários tanques dispostos uns em cima de outros, como mostra a figura 3.22. A água capturada pelos reservatórios retorna ao mar atravessando uma turbina com vários estágios. Os vários reservatórios permitem ter um maior proveito da energia das ondas do que dispositivos com apenas um reservatório [52].

O projeto recebeu, em 2008, fundos significativos (perto de 4 milhões de euros) o que induziu o planeamento de duas plantas de SSG para testes na costa norueguesa. No entanto, até ao momento não existem estudos em alto mar [52]. Na Universidade de Naples *Frederico II* realizaram-se testes num protótipo em pequena escala, 1:66. Os restantes testes realizados sobre este mecanismo são testes em modelos numéricos com vista a otimizar o design de forma e aumentar a eficiência [53].

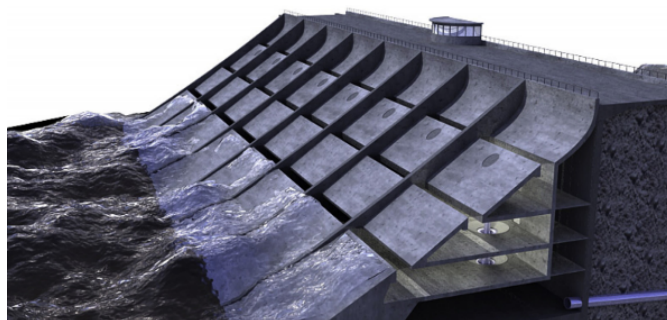


Figura 3.22: Ilustração de slot-cone com três reservatórios. Adaptado de *Nature and magnitude of wave loadings at Seawave Slot-cone Generators* [52].

3.2.6 Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão

Os dispositivos submersos de diferença de pressão estão normalmente ligados ao fundo do mar. A diferença de pressões no dispositivo deve-se à alteração do nível do mar pelas ondas, permitindo comprimir e descomprimir ar, tal como nos dispositivos de galgamento.

mWave O mWave foi desenvolvido pela Bombora Wave Power, uma empresa australiana, de preferência para utilização perto da costa. A estrutura principal do sistema é composta por membranas flexíveis que cercam células de ar, como mostra a figura 3.23. A pressão hidráulica das ondas sobre estas membranas causa pressão do ar no interior das células. O ar pressurizado nas células alimenta um circuito pneumático, através de válvulas de não-retorno. No circuito o ar passa por uma turbina para gerar energia e retorna a células de baixa pressão. O dispositivo pode ser implementado no fundo do mar ou abaixo da superfície. Como forma de proteção contra ondas extremamente fortes, é possível diminuir progressivamente o movimento das membranas ao retirar o ar das células [54].

A Bombora Wave Power pretende começar em Peniche, Portugal, a instalação de um conjunto de mWave's a nível comercial, numa capacidade total de 60 MW. Primeiramente seriam realizados testes com capacidade de 1.5 MW, no entanto em 2017 encontrava-se ainda a obter autorização para a implementação dos dispositivos [55].

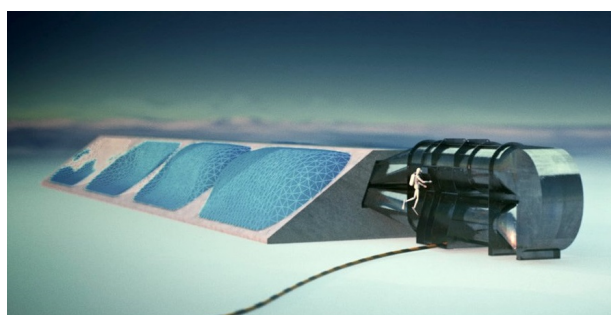


Figura 3.23: Ilustração de um dispositivo mWave. Adaptado de *Marine Energy* [55].

3.2.7 *Bulge Wave*

Os mecanismos caracterizados como *bulge wave* utilizam uma perturbação num tubo causada pelas ondas, para alimentar uma turbina numa das extremidades desse tubo.

Anaconda O dispositivo Anaconda foi desenvolvido pela Checkmate Sea Energy e consiste num tubo de borracha que opera abaixo da superfície em zonas com 50 m de profundidade [56]. O tubo está cheio com um líquido que, com o movimento das ondas, se desloca para as zonas mais baixas e sofre pressões devido à gravidade e também por apertos que o tubo sofre. O fluido pressurizado move-se até à ponta, onde se encontra uma turbina hidráulica, que gera energia. De forma a manter o tubo de encontro com a direção das ondas, é amarrado ao fundo na parte frontal [57].

Até 2011 apenas protótipos com 8 m de comprimento tinham sido testados. De forma a gerar 1 MW o dispositivo terá um comprimento de 150 m [58]. Em 2016 iniciaram testes numéricos e simulações, após o conceito receber um incentivo por parte do governo escocês. Poucos dispositivos semelhantes a este foram desenvolvidos, sendo que em 2017 apenas o Vigor Wave Energy Converter se aproximava a este princípio de funcionamento.



Figura 3.24: Ilustração de uma planta de Anacondas. Adaptado de *Checkmate Sea Energy* [59].

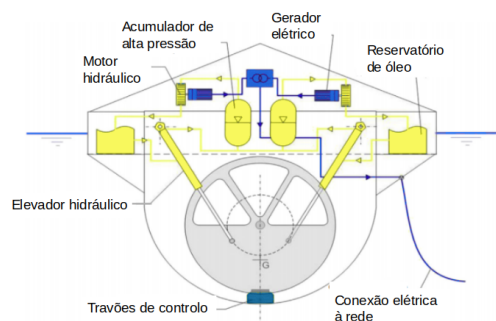
3.2.8 *Rotating Mass*

Os dispositivos pertencentes à categoria *rotating mass* retiram energia do movimento do equipamento, o qual está ligado a gerador dentro do mecanismo.

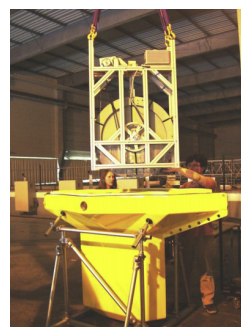
SEAREV O SEAREV foi desenvolvido em 2002 por um grupo de cientistas pertencentes à Ecole Centrale de Nantes. O dispositivo é composto por uma roda, cujo centro de massa está descentralizado. A roda comporta-se como um pêndulo, que oscila com o movimento de todo o dispositivo devido ao movimento das ondas. Este movimento relativo, entre a roda e o invólucro do dispositivo, ativa um sistema hidráulico que retira energia para um gerador elétrico. Os componentes do sistema hidráulico assim como os componentes do dispositivo estão esquematizados na figura 3.25a. Todas as partes móveis do sistema encontram-se protegidas pelo invólucro, o que traz uma grande vantagem em termos de durabilidade do mecanismo [17]. O sistema está amarrado ao fundo apenas por um ponto de amarração, o que permite que o mecanismo se alinhe com a direção principal das ondas [60].

Entre 2002 e 2005 apenas simulações numéricas tinham sido feitas, com vários modelos desenvolvidos com o intuito de maximizar a *performance* do SEAREV, com estudos sobre

a forma, o sistema de captação de energia e sistema de amarração. Com estes modelos conclui-se que o SEAREV teria uma produção de energia anual de 600 MWh. Em 2005 foi construído um protótipo com escala 1:12, como ilustra a figura 3.25b, e em 2006 testado num tanque de ondas na mesma escola de engenharia onde foi concebido. Os testes permitiram detetar problemas relativos à forma do dispositivo e robustez. Entre 2006 e 2009 várias versões do dispositivo foram concebidas assim como respetivos protótipos à escala, numa tentativa de otimizar a forma [61].



(a) Esquema dos componentes de um SEAREV. Adaptado de *Case study of the development of a wave energy converter* [61].



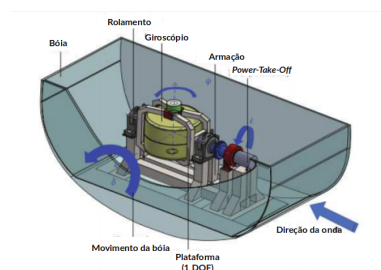
(b) Assemblagem do protótipo do SEAREV na escala 1:12. Adaptado de *Case study of the development of a wave energy converter* [61].

Figura 3.25: Ilustração de um SEAREV e protótipo de testes.

ISWEC O ISWEC, também designado por Inertial Sea Wave Energy Converter, é um mecanismo que retira energia das ondas, desenvolvido pela Wave for Energy, uma empresa situada no norte de Itália. Um ISWEC é composto principalmente por um corpo flutuante e um giroscópio no interior. O movimento das ondas provoca um movimento de balanço no corpo flutuante. O giroscópio será movido como resultado do balanço do corpo flutuante e da velocidade de rotação de uma roda giratória, que faz parte do giroscópio, como descreve a figura 3.26a. Como consequência destas atividades, gera-se um binário em torno do eixo paralelo à direção das ondas, que por sua vez ativa o gerador elétrico [62].

Vários testes numéricos e simulações foram realizados até 2009, data de desenvolvimento do primeiro protótipo físico à escala 1:12.. O protótipo foi testado num tanque de ondas na Universidade de Edimburgo (figura 3.26b), onde concluiu que a potência de saída era pulsante, problema comum a muitos conversores de energia de ondas [62]. Um protótipo em escala real foi lançado em 2015 para testes na ilha de Pantelleria em Itália [63].

Penguin Em 2008, a empresa finlandesa Wello Oy iniciou o desenvolvimento de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas denominado Penguin. O Penguin é semelhante a um barco assimétrico com uma massa excêntrica no interior, como mostra a figura 3.27a. O movimento do "barco" provoca movimento na massa que está acoplada a um veio. A energia é gerada através de um gerador também acoplado ao veio [64]. Um mecanismo à escala prevê uma potência de 0.5 MW a 1 MW [65].



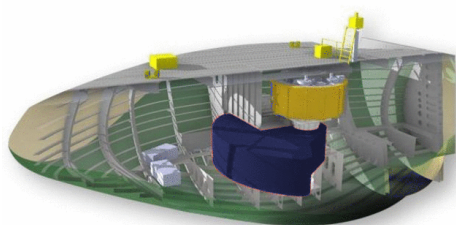
(a) Esquema representativo do ISWEC e componentes associados. Adaptado de Control of the Wave Energy Converter ISWEC in Simulation [63].



(b) Protótipo à escala 1:12 na Universidade de Edimburgo. Adaptado de Control of the Wave Energy Converter ISWEC in Simulation [63].

Figura 3.26: Ilustração e protótipo do ISWEC nos vários estágios de desenvolvimento.

De 2008 a 2011 realizaram-se testes em protótipos com escala 1:18 em tanques de ondas e 1:8 em ambiente marinho, com os quais se obteram bons resultados. Como consequência, a equipa passou a desenvolver um modelo em escala real com capacidade de 1 MW. Este protótipo foi deslocado até Orkney, Escócia, em 2012 (figura 3.27b) [64]. Em 2018 foi construído um novo Penguin com maior capacidade, para ser sujeito a testes na China em parceria com a CIMC (China International Marine Containers). Prevê-se em 2019 o desenvolvimento de um terceiro Penguin [66].



(a) Esquema representativo do Penguin. Adaptado de BBC News [67].



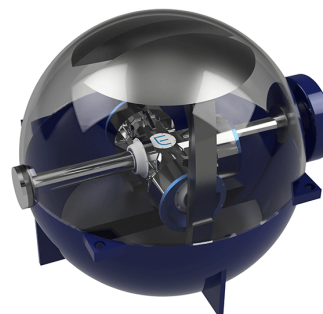
(b) Penguin na costa de Orkney em 2012. Adaptado de Electricity from Wave and Tide [64].

Figura 3.27: Ilustração e registo do Penguin.

WITT O WITT não é necessariamente um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas, mas sim um dispositivo que converte energia cinética em energia elétrica, com recurso a um pêndulo e uma caixa de velocidades, como mostra a figura 3.28a. Este dispositivo pode ter várias aplicações, uma delas sendo a energia das ondas. O WITT WEC opera à superfície e é capaz de retirar energia ao longo de movimentos nos dois eixos horizontais, ou seja, extrai energia independentemente da direção das ondas. O WITT WEC pode ser aplicado em diferentes boias em alto mar para gerar energia. Como mostra a figura 3.28b, todas as partes móveis do mecanismo estão protegidas pelo invólucro, o que aumenta a longevidade do dispositivo [68].



(a) Mecanismo WITT. Adaptado de Modelling of the WITT wave energy converter [68].



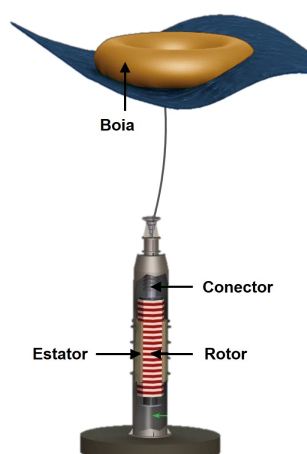
(b) WITT adaptado à extração de energia no mar. Adaptado de WITT [69].

Figura 3.28: Mecanismo WITT e adaptação do mecanismo à energia de ondas.

3.2.9 Outros

Uppsala University WEC A Universidade Uppsala na Suécia desenvolveu um conversor de energia com objetivo de operar em alto mar, em plantas com um número de conversores previsto de 1000. O sistema é simples, composto por uma boia que funciona como absorvedor pontual na superfície, e um gerador magnético linear instalado no fundo do mar, como ilustra a figura 3.29a. O gerador receberá o movimento da boia através de um cabo de aço, o que permite a geração de energia [70].

Desde 2006, mais de 10 protótipos foram testados na costa da Suécia. A figura 3.29b mostra o registo do transporte do protótipo número 9 para a costa de Lysekil em 2009.



(a) Ilustração dos componentes de um Uppsala WEC. Adaptado de *Preparing the Uppsala University Wave Energy Converter Generator for Large-Scale Production* [70].



(b) Protótipo Uppsala WEC L9 transportado para a costa de Lysekil. Adaptado de *Experimental results on power absorption from a wave energy converter at the Lysekil wave energy research site* [71].

Figura 3.29: Ilustração de um Uppsala WEC e transporte do Uppsala WEC L9.

WEPTOS WEC O conversor de energia WEPTOS foi desenvolvido pela Weptos, uma empresa dinamarquesa. Consiste numa estrutura em forma de "A" conectada a várias boias absorvedoras de energia, com geometria inspirada no Salter Duck, como mostra a figura 3.30. Semelhante ao WaveCat, também o ângulo entre os dois limites laterais, onde estão as boias, pode variar. No caso do WEPTOS WEC, o ângulo mínimo é 13° e o máximo 120° . Esta característica permite que o dispositivo se adapte às condições marítimas e, conseqüentemente, produza energia de forma mais estável. As boias estão conectadas a um eixo comum, e transmitem a potência das ondas para este eixo, que roda numa direção [72].



Figura 3.30: Ilustração de um WEPTOS WEC. Adaptado de *The extensive R&D behind the Weptos WEC* [72].

3.3 Problemas Associados aos Dispositivos Conversores de Energia das Ondas

O estado dos projetos em torno dos dispositivos conversores de energia abordados neste capítulo, assim como falhas ao longo dos seus tentes, encontram-se na tabela 3.1. Apesar da elevada quantidade de tecnologias desenvolvidas e dispositivos testados, existem múltiplos problemas associados aos dispositivos conversores de energia. Os problemas principais estão associados às condições ambientais desafiadoras. Componentes como engrenagens, geradores e amarrações afetam a durabilidade dos dispositivo devido ao meio em que se encontram. Ainda relacionado com o ambiente, em condições extremas como tempestades, os dispositivos podem ser danificados [73]. Como se verificou nos sistemas apresentados anteriormente, uma quantidade significativa deles apresenta uma tecnologia de proteção contra condições mais agressivas. Os dispositivos com os mecanismos móveis protegidos por uma estrutura, que evitam a sua exposição ao meio, são vantajosos no sentido de expandir a durabilidade. Relativamente aos sistemas de amarrações, são outro grande problema em termos de fiabilidade de um dispositivo e até mesmo em termos de *performance*. No caso de uma corrente esticada, a probabilidade de quebrar ou do sistema de âncora ser arrastado pelo fundo do mar é maior. No entanto, uma corrente solta diminui a eficiência dos mecanismos que se baseiam em movimentos relativos [25].

Por outro lado, a quantidade elevada de dispositivos com tecnologias muito distintas traz desvantagens. O custo das tecnologias e da ligação à rede beneficiaria de uma uniformização das tecnologias [73].

A facilidade de instalação e manutenção dos dispositivos são fatores cruciais e que interferem no custo dos dispositivos. Por esta razão, devem se ter em conta durante o desenvolvimento e projeto de um novo dispositivo.

Tabela 3.1: Estado atual dos dispositivos conversores de energia estudados neste capítulo.

Classificação do dispositivo	Dispositivo	Estado do projeto
Atenuadores	Pelamis	Falhas do sistema de amarramento ao fundo em 2007, nos dispositivos instalados no Parque de Ondas da Aguçadoura.
	StingRay	Desconhecido.
	Power Wing e Wave Clapper	Sistema ativo na costa de Gibraltar, com potencial de geração até 100 kW.
	Wave Star	Protótipo desativado em 2016 devido à falta de fundos, depois de ter gerado energia para a rede durante alguns anos.
	Floating Duck e Eagle Wave Energy Converter	Sob investigação após estudo de um protótipo em alto mar de 2015 a 2016.
Absorvedores pontuais	CETO	Amarrações ao fundo do mar destruídas por um furacão no primeiro protótipo. Atualmente encontra-se sob estudos de otimização de custos de produção.
	Power Buoy	Versão pré-comercial instalada em 2019 com geração de potência até 3 kW.
	Searaser	Desconhecido.
	Pontoon Power Converter	Realizados estudos em tanques de ondas. Atualmente sem fundos para continuar estudos.
	Lifesaver	Problemas no sistema de geração de energia durante testes em alto mar.
Conversores oscilantes de translação	Wave Roller	Protótipo pré-comercial instalado em 2010 em Peniche, onde produziu energia para a rede. Atualmente encontram-se a desenvolver um segundo projeto em Portugal com um dispositivo melhorado.
	BioWave	Protótipo retirado de alto mar em 2019 devido a problemas no cabo de ligação à rede elétrica e incapacidade de geração de energia.
	Langley System	Atualmente em fase de testes em tanques de água.
Colunas de água oscilante	Pico	Apresentou problemas de ressonância mecânica após alguns anos de funcionamento, o que levou a uma estrutura muito frágil, acabando por colapsar em 2018 e consequente remoção da ligação à rede elétrica.
Dispositivos de galgamento	Wave Cat	Fase de testes em tanque de água.
	Wave Dragon	Desconhecido.
	Seawave Slot-Cone Generator	Fase de testes numéricos.
Dispositivo submerso de diferença de pressão	mWave	Período de espera pela autorização da implementação de um dispositivo com 1.5 MW.
<i>Bulge wave</i>	Anaconda	Fase de testes em tanque de água.
textit Rotating mass	SEAREV	Problemas detetados na forma e na robustez do protótipo.
	ISWEC	Problemas de produção de energia pulsante (intervalos de tempo com geração de energia nula).
	Penguin	Último protótipo apresentou problemas na estrutura o que levou ao seu afundamento. Novo protótipo atualmente em fase de estudo.
	WITT WEC	Desconhecido.
Outros	Uppsala University WEC	Desconhecido.
	WEPTOS WEC	Detetaram-se problemas de aquisição de dados e geração de corrente elétrica no primeiro protótipo em alto mar.

Capítulo 4

Desenvolvimento do Conceito

4.1 Conceitos Iniciais

O dispositivo de conversão de energia das ondas a ser desenvolvido deve acomodar um gerador linear, e fazer uso das vantagens que este gerador acarreta, para estes mecanismos em particular, tanto de transmissão direta de movimento ao íman ou por levitação magnética. As ideias iniciais de possíveis estruturas para o mecanismo encontram-se na tabela 4.1, ilustradas com esboços simples, com recurso ao *software* Solidworks. De notar que estes esboços (assim como todos desta secção) são apenas representativos do funcionamento da proposta, e a sua estrutura e posicionamento dos elementos pode ser completamente alterada em fases mais avançadas, no caso do conceito progredir para fases seguintes do projeto.

4.1.1 Análise dos Conceitos Propostos

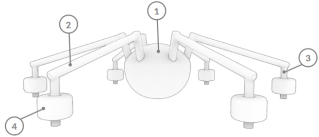
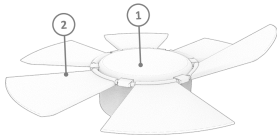
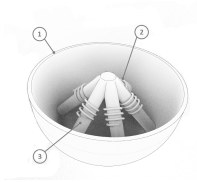
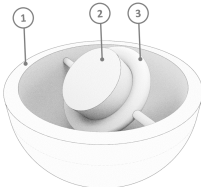
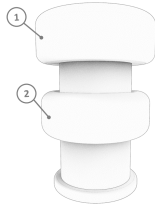
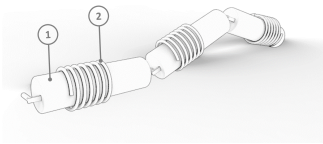
Seguidamente, os conceitos iniciais são sujeitos a uma análise crítica, com vista a identificar quais dos conceitos apresentam potencial para avançar, assim como desenvolver novos conceitos, com base nas falhas anteriores.

Atendendo a problemas nas juntas verificados em conceitos anteriormente desenvolvidos, o segundo e último conceito da tabela 4.1 devem ser abandonados, devido à previsão de uma probabilidade grande de destruição em alto mar.

Tendo em conta que uma das vantagens do gerador é a diminuição das amarrações ao fundo, a necessidade de fixar boias do primeiro conceito da tabela 4.1 é um dos problemas principais. Para além disso, as extensões da boia principal poderiam ser aproveitadas em todo o seu comprimento, introduzindo mais ímans e bobines ao longo das extensões. Esboços ilustrativos desta solução encontra-se na figura 4.1, no entanto não apresenta solução para as amarrações. Por outro lado, a possível necessidade de juntas é outro problema por solucionar.

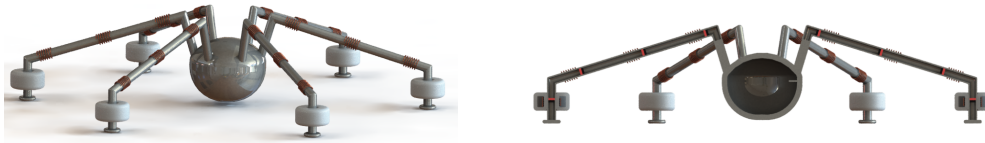
A terceira proposta ilustrada na tabela 4.1 apresenta dois problemas principais: espera-se a baixa geração de energia e a estagnação dos ímans no interior dos tubos devido à ação da gravidade. Uma possível forma de solucionar o problema da estagnação ou pouca oscilação dos ímans, passa pela adição de uma massa livre que compense o peso do total dos ímans. Por outro lado, diminuir o ângulo dos tubos, no sentido de os aproximar a uma posição horizontal, diminuiria a tendência dos ímans se manterem na extremidade desses tubos. Na figura 4.2 é possível ver um esboço do conceito, com uma

Tabela 4.1: Esboços e descrição dos primeiros conceitos desenvolvidos.

Conceito	Descrição
	A boia central livre (1) capta o movimento das ondas, e as suas extensões (2) acompanham este movimento. No interior destas extensões, na extremidade (3), encontram-se ímãs que se movem em relação às bobinas fixas (4) à sua volta.
	A geração de energia neste sistema encontra-se nas pás (2). A boia central (1), mais densa, contém os eixos de rotação das pás, as quais se movem com a agitação marítima. No interior destas devem existir bobinas fixas em torno de ímãs com possibilidade de se movimentarem perpendicularmente ao eixo de rotação das pás.
	O mecanismo é composto por uma boia (1) que alberga, no seu interior, um sistema de tubos (2). No interior dos tubos existem ímãs em levitação (ou com outra forma de movimentação ao longo do tubo) e a envolver, no exterior, bobinas fixas (3). O movimento dos ímãs provém do movimento da boia consequente do movimento das águas.
	O sistema é composto por uma boia (1) que contém no interior um mecanismo semelhante a um giroscópio. O contentor central (2) envolve um ou vários ímans. O tubo (3) que envolve o contentor possui um enrolamento. Com o peso do íman e o movimento da boia devido às ondas, o contentor roda em torno de um eixo, oscilando o íman no seu interior.
	O mecanismo é simples e baseia-se na diferença de densidade entre duas boias. Considerando uma boia interior (1) de baixa densidade, que contém os ímans e se move em relação a uma boia de maior densidade (2), praticamente imóvel, que contém os enrolamentos.
	O conceito é constituído por vários cilindros (1) com juntas rotacionais entre eles. No interior dos cilindros existem ímãs com movimento livre paralelo ao eixo do cilindro e, em torno dos cilindros, existem bobinas (2) fixas.

esfera que funciona como massa livre. O movimento da boia e consequente oscilação dos ímans no interior das bobinas gera energia. No entanto, a expectativa de geração de energia neste conceito é bastante baixa, pois prevê-se que o movimento dos ímans seja muito reduzido.

O quarto conceito da tabela 4.1, apresenta problemas no potencial da geração de energia. Uma solução que pode melhorar o aproveitamento do movimento das ondas, trata de colocar o contentor do íman a rodar em torno de mais do que um eixo de rotação. Assim, criou-se um giroscópio com dois eixos de rotação, como ilustram os esboços da figura 4.3.



(a) Ilustração das boias e possível localização de enrolamentos nas extensões. (b) Representação da possível localização de ímans no interior das extensões.

Figura 4.1: Ilustração dos esboços da melhoria do primeiro conceito desenvolvido.



(a) Ilustração de uma vista lateral em corte do esboço de conceito. (b) Ilustração de uma vista de cima em corte do esboço de conceito.

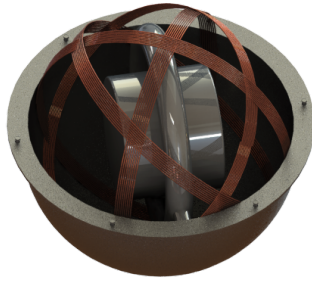
Figura 4.2: Ilustração dos esboços da melhoria do terceiro conceito desenvolvido.



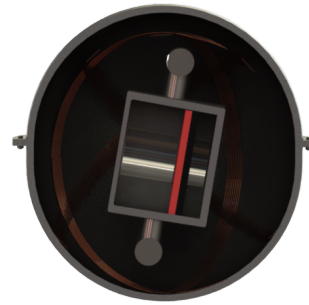
(a) Ilustração de uma vista lateral em corte do esboço de conceito com giroscópio. (b) Ilustração de uma vista de cima em corte do esboço de conceito com giroscópio.

Figura 4.3: Ilustração dos esboços do conceito do giroscópio, reformulado com dois eixos de rotação.

No conceito inicial, o enrolamento situa-se no tubo que envolve o contentor do íman, o qual acompanha o movimento do contentor. No entanto, este movimento é um problema para ligar os cabos que transportam a energia elétrica gerada na bobine. Por outro lado, apenas um íman e uma bobine geram pouca energia. Desta forma, esboçou-se o solução ilustrada na figura 4.4, com um maior número de bobines e ímans, e bobines fixas à lateral da boia. Esta solução, apesar de responder aos problemas anteriores, gera um problema de distanciamento das bobines aos ímans, o que diminui o efeito que da indução magnética, o qual deve se ter em conta numa fase posterior de análise.



(a) Ilustração de um exemplo do posicionamento das bobinas fixas à lateral da boia.



(b) Ilustração do íman numa vista de corte frontal.

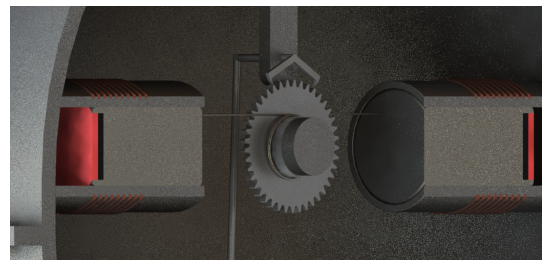
Figura 4.4: Ilustração dos esboços do conceito do giroscópio, reformulado com bobinas fixas às laterais.

O conceito inicialmente desenvolvido, com base nas diferenças de densidades apenas proveniente dos materiais (quinto conceito da tabela 4.1), dificilmente terá movimentos relativos consideráveis para gerar energia. Uma forma de melhorar o conceito, passaria pela implementação de um sistema de válvulas que utilizasse a água do mar para fazer variar as densidades das boias.

Ao longo da análise de conceitos iniciais surgiram duas novas ideias de possíveis mecanismos que incorporam o gerador proposto. Inicialmente discutiu-se um sistema composto por vários pistões, os quais transportam os ímans, envolvidos por enrolamentos, todos conectados à mesma massa livre. O equilíbrio que esta massa exerce no sistema é perturbado pelo movimento das ondas na boia, o que leva ao movimento da massa e consequente movimento dos ímans. Na figura 4.5 encontram-se ilustrados esboços deste sistema, sendo que assumiu-se uma massa esférica, e os pistões estão conectados por cabos de aço ao mecanismo de transmissão de movimento.



(a) Ilustração do interior da boia com a massa livre na posição de equilíbrio.



(b) Ilustração detalhada de uma proposta simplificada do mecanismo.

Figura 4.5: Ilustração dos esboços do conceito da massa livre.

Por fim, surgiu o conceito de uma plataforma flutuante, cujo princípio de funcionamento é semelhante ao quinto conceito apresentado na tabela 4.1: obter movimento relativo entre duas boias. Uma possível configuração para o sistema

encontra-se ilustrada nos esboços da figura 4.6. A boia fixa foi substituída por uma plataforma. Na parte inferior da plataforma existem cavidades que confinam boias de menor dimensão. No interior destas boias encontram-se ímanes, enquanto os enrolamentos se situam em volta das cavidades, no interior da plataforma. O movimento relativo entre a plataforma e as boias provém da diferença de dimensões, sendo que a plataforma deve ser, aproximadamente, estática.



(a) Ilustração do posicionamento das bobinas e cavidades, visto do interior da plataforma.

(b) Ilustração dos ímanes no interior das boias, representadas com diferentes níveis de flutuação.

Figura 4.6: Ilustração dos esboços do conceito da plataforma flutuante.

Analisando os conceitos apresentados, as propostas apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2 não são viáveis devido à necessidade de juntas expostas ao ambiente e baixa geração de energia, respetivamente. Assim, restam os conceitos do giroscópio (figura 4.4), da massa livre (figura 4.5), e da plataforma flutuante (figura 4.6). Com vista a escolher o conceito com mais potencial para desenvolver o protótipo, avaliaram-se os três conceitos em diversos parâmetros que se assumiram pertinentes para um mecanismo de conversão de energia das ondas. Os parâmetros são os seguintes:

- Inovação;
- Potencial de geração de energia;
- Viabilidade de construção;
- Facilidade de manutenção;
- Resistência à fadiga e deterioração;
- Impacto negativo na poluição dos oceanos e no habitat das espécies no meio aquático;
- Impacto negativo na paisagem.

O conceito do giroscópio é semelhante ao conceito da massa livre em quase todos os parâmetros, no entanto, o seu potencial de geração de energia espera-se inferior ao conceito da massa livre, já que o movimento dos ímanes é dependente apenas do próprio peso. A sua construção espera-se pouco viável devido ao difícil posicionamento das bobinas, consequência dos seis eixos de liberdade do movimento do contentor dos ímanes. Por estas razões, o conceito do giroscópio não foi desenvolvido. Comparando as duas propostas restantes, a plataforma flutuante é um conceito inovador por se tratar de movimentos relativos sem amarração ao fundo. Prevê-se ainda que a plataforma tenha

um maior potencial de geração de energia por metro quadrado. No entanto, tem um maior impacto negativo tanto na paisagem como no habitat das espécies, devido a impedir a passagem de luz para baixo da superfície oceânica, de uma forma mais uniforme. Apesar dos dois conceitos se apresentarem promissores concluiu-se, com base nos parâmetros, que a plataforma tem um maior potencial de desenvolvimento mas o seu impacto no meio ambiente deverá ter-se em conta no futuro.

4.2 Desenvolvimento do Conceito Final

Partindo do conceito da plataforma, pretende-se projetar um protótipo funcional e que permita tirar conclusões, de forma a evoluir o conceito até um mecanismo viável de conversão de energia das ondas em alto mar. O esboço apresentado na figura 4.6 é apenas representativo e não apresenta um protótipo funcional.

A plataforma deve integrar as bobinas, no entanto, a sua zona de enrolamento deve ser possível de extrair para facilitar a bobinagem ao mesmo tempo que está completamente isolada da água. A plataforma será constituída por cavidades onde os ímans se deslocam por movimento das boias. O comprimento do tubo bobinado deve ser próximo da altura das ondas geradas, de forma a aproveitar todo o curso da boia. Os ímans devem ser transportados por boias com pequenas dimensões relativamente à plataforma. Os ímans devem estar o mais próximo possível do enrolamento para que o campo magnético seja maior na zona da bobine.

Para um primeiro protótipo definiu-se a forma da plataforma como retangular. Neste caso, o maior comprimento deve ser igual ou superior ao comprimento das ondas, de forma a estabilizar a plataforma. Avaliaram-se duas distribuições das cavidades na plataforma, uma distribuição alinhada e uma distribuição intercalada, ilustradas na figura 4.7. Apesar da distribuição intercalada permitir um menor número de cavidades, permite um melhor aproveitamento da onda ao longo de todo o seu comprimento. Considerou-se o formato das boias cilíndrico devido a ser o formato que melhor aproveita o movimento vertical das ondas [74]. Ainda na fase do primeiro protótipo, o formato do gerador linear não foi otimizado, utilizando-se um formato simples de 1 enrolamento com os ímanes no seu interior.

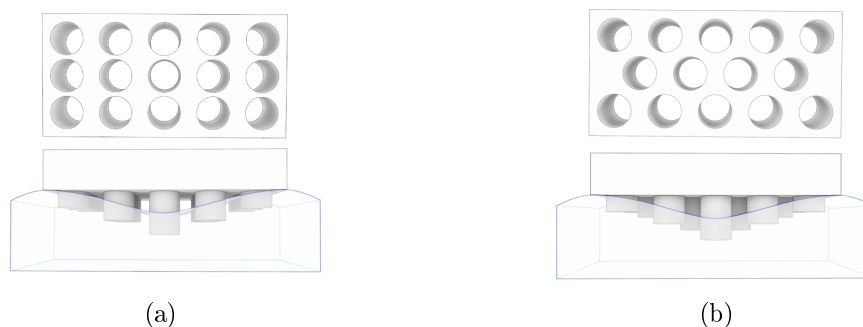


Figura 4.7: Esquemas da vista de cima e lateral da plataforma com distribuição das cavidades e respectivas boias alinhadas (a) e intercaladas (b).

A primeira proposta, ilustrada na figura 4.8, apresenta uma plataforma maciça composta por duas cavidades concêntricas para cada módulo. Entenda-se como módulo

o conjunto do tubo bobinado e respetiva boia com ímans. A cavidade superior apoia o tubo bobinado e a cavidade inferior acomoda a boia no seu final de curso. Nesta proposta, as zonas de guiamento (contato entre o módulo com o interior do tubo onde se desloca) são reduzidas. Por outro lado, existem problemas de vedação: a zona das bobines não deve ser suscetível de entrar água, tanto pela cavidade da boia como zona superior aberta da plataforma.

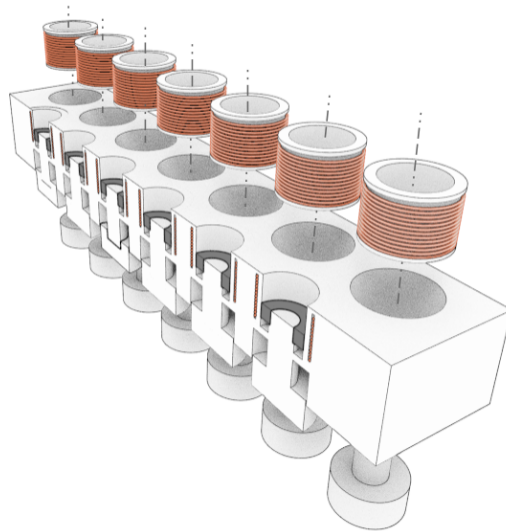


Figura 4.8: Esboço da primeira proposta para protótipo em vista de corte, com as bobines representadas a laranja e os ímans a cinzento.

De forma a corrigir os problemas do conceito anterior, apresenta-se a proposta ilustrada na figura 4.9, tratando-se agora de uma plataforma oca, o que facilitará a escolha do material em termos de peso. Os tubos bobinados consideram-se apenas colados à superfície interior da plataforma. Neste caso, toda a boia, assim como o íman, são zonas de guiamento. Adicionaram-se vedantes abaixo dos enrolamentos, assim como uma tampa para evitar possíveis infiltrações de água, tanto nas bobines como no interior da plataforma. Um possível problema detetado neste conceito é o atrito excessivo devido à elevada zona de contacto entre o módulo e o tubo. A boia cilíndrica com diâmetro constante está limitada pelo diâmetro do tubo bobinado, o que pode condicionar a impulsão da boia no caso desse diâmetro ser de pequena dimensão comparativamente à onda.

De maneira a permitir a maior impulsão da boia, a zona inferior tem um maior diâmetro, comparativamente ao resto da bóia. Existe ainda na plataforma uma zona de encaixe para facilitar a colocação dos tubos bobinados, como mostra a figura 4.10.

Para resolver o problema do atrito, apenas dois segmentos da zona superior da boia têm o mesmo diâmetro que o diâmetro interior do tubo: abaixo do íman e sobre o íman, como mostra a figura 4.11. Sobre o íman colocou-se um anel roscado, o que também funciona como sistema de aperto do íman. No sentido de obter o conceito final (figura 4.11) fizeram-se algumas alterações na plataforma: em vez de uma plataforma completamente oca, embutiram-se tubos que servem de isolamento aos tubos bobinados. Abriam-se ainda furos na zona inferior para acomodar vedantes.

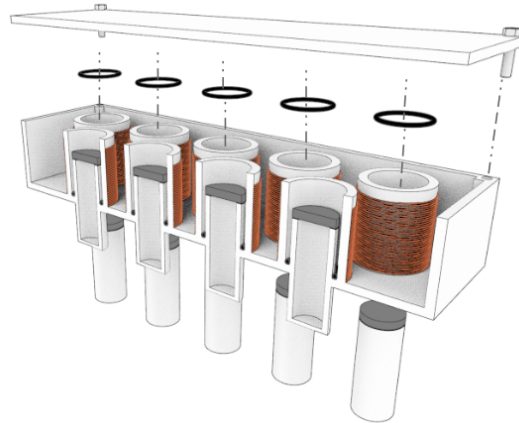


Figura 4.9: Esboço da segunda proposta para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobinas, a cinzento os ímans e a preto estão representados os vedantes.

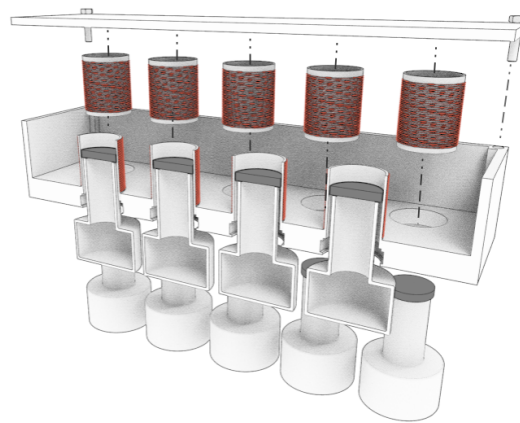


Figura 4.10: Esboço da terceira proposta para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobinas e a cinzento os ímans.

4.3 Desenvolvimento e Materiais do Protótipo

Partindo do esboço do conceito final (4.11), pretende-se projetar um protótipo para ser submetido a testes. Começa-se por definir um protótipo à escala 1:500, para obter as medidas gerais da plataforma. Como apresentado na secção relativa à costa portuguesa, na data de aquisição dos dados, o mar de Leixões apresenta uma altura de onda média de 2.58 metros e um período médio correspondente de 8.9 segundos. Com este período obtém-se um comprimento de onda de, aproximadamente, 123.5 metros. Sabe-se que a plataforma deve ter um comprimento igual ou superior ao comprimento de onda, atribuindo-se por isso um comprimento de 150 metros. O curso da bóia, ou seja, a altura do tubo bobinado, deverá corresponder à altura da onda. Recorrendo à escala definida, a plataforma do protótipo terá um comprimento de 300 milímetros e 52 mm de altura de tubo bobinado. Apesar de, na proposta de protótipo da figura 4.11, existir apenas uma boia com diferentes diâmetros, optou-se por separar as boias em duas: uma boia inferior

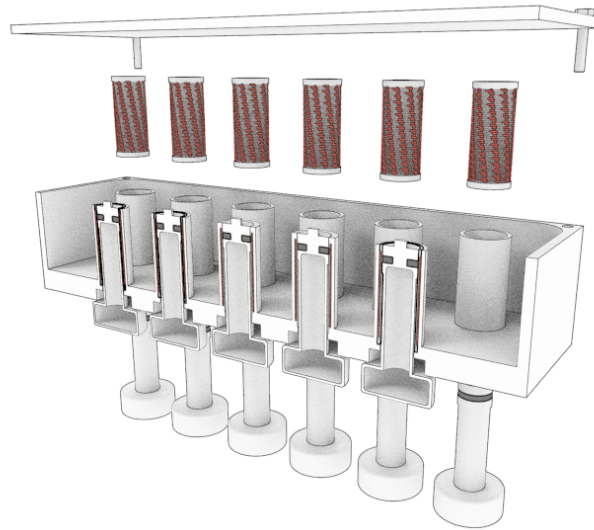


Figura 4.11: Esboço da proposta final para protótipo. A laranja estão esboçadas as bobinas e a cinzento os ímans.

e outra boia de transporte do íman, como representado na figura 4.12, para facilitar a produção e montagem. Ainda a pensar na simplificação da montagem estabelece-se que o encaixe dos anéis será feita recorrendo a roscas. Por fim, como componente de vedação escolhem-se vedantes de lábio, regularmente utilizados em ambientes aquáticos. Com as dimensões gerais e estrutura dos componentes delineadas, segue-se a escolha de materiais e determinação das dimensões dependentes destes.

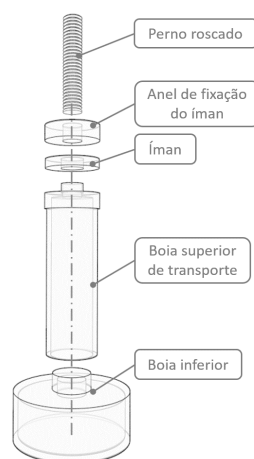


Figura 4.12: Esquema dos constituintes de um módulo do protótipo.

Para os tubos a bobinar utilizaram-se tubos de PVC com diâmetro interior de 17,6 milímetros e diâmetro exterior de 20 milímetros. Inicialmente, tendo em conta este diâmetro exterior, atribuiu-se uma largura de 150 milímetros à plataforma e distribuíram-se 17 tubos ao longo da plataforma (e consequentemente 17 módulos). No

entanto, o custo e tempo de trabalho para maquinar as 17 módulos e tubos bobinados seria elevado. Optou-se por reduzir a largura da plataforma para apenas 100 milímetros e distribuir 9 tubos, com um maior espaçamento entre eles. O diâmetro dos anéis de apoio à montagem deve ser igual ou superior ao diâmetro exterior dos tubos de PVC, para segurar as boias na posição de final de curso e permitir o transporte da plataforma com as boias montadas. O diâmetro dos anéis de fixação dos ímanes deve corresponder ao diâmetro interior dos tubos de PVC, funcionando como zona de guiamento como já mencionado. Isto posto, definiu-se o diâmetro dos anéis de apoio como 22 milímetros e o diâmetro dos anéis de fixação como 17,3 milímetros. A diferença de 0,3 milímetros comparando ao diâmetro interior dos tubos tem como objetivo evitar demasiado atrito ou até a impossibilidade do encaixe, já que o tubo de PVC não foi maquinado no interior e as suas dimensões não são precisas. O anéis de apoio têm 3 milímetros de altura de forma a reduzir o tamanho ao máximo mas ao mesmo tempo permitir o fácil manuseamento, enquanto os anéis de fixação têm 5 milímetros de altura, devido à sua função de guiamento.

Define-se que a plataforma será maquinada a partir de um bloco de plástico. O plástico da plataforma deverá reunir um conjunto de características tendo em conta a forma final e o meio onde vai funcionar:

- Baixa densidade (inferior à densidade da água);
- Baixa ou nula absorção de água;
- Fácil maquinação;
- Boas propriedades deslizantes.

Após feita uma análise dos plásticos disponíveis no mercado, tendo em conta as características mencionadas e o preço de cada plástico, optou-se por polietileno de alta densidade extrudido, também designado no mercado por PE-HD. Este material tem uma densidade de 960 kg/m^3 . Para além da plataforma, definiu-se o PE-HD os restantes componentes a maquinar, sendo estes a tampa da plataforma, a boia de transporte do íman, o anel de fixação do íman e os discos de apoio à montagem. Devido à forma mais complexa das boias inferiores, optou-se por obtê-las através de impressão 3D utilizando um filamento de PLA. A impressão 3D permite obter formas mais complexas e é um dos processos mais baratos, porém a sua precisão e o seu acabamento levam a que os restantes componentes não sejam produzidos através deste processo.

Tendo em conta que a plataforma está ligeiramente submersa, o conjunto das boias e íman devem ter um peso tal que o íman inicie o seu curso a meio do tubo, com intuito de aproveitar todo o curso da onda. Este peso está relacionado com a altura da boia que está submersa, diretamente relacionada com a altura a que o íman se encontra no interior do tubo. Recorrendo ao Princípio de Arquimedes e ao conceito de impulsão, é possível calcular a altura submersa de um corpo flutuante. Sabe-se que um corpo que flutua sofre uma força de impulsão F_I igual ao seu peso F_P e que a força de impulsão está relacionada com a massa de fluido deslocado pelo corpo. O problema é formulado de acordo com as equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, que utilizam a m_{fluido} , g , m_{corpo} , ρ_{fluido} , $h_{submersa}$, ρ_{corpo} , h_{total} e A_{sup} .

$$\vec{F}_I = \vec{F}_P \quad (4.1)$$

$$m_{fluido} \cdot g = m_{corpo} \cdot g \quad (4.2)$$

$$\rho_{fluido} \cdot h_{submersa} \cdot A_{sup} \cdot g = \rho_{corpo} \cdot h_{total} \cdot A_{sup} \cdot g \quad (4.3)$$

$$h_{submersa} = \frac{\rho_{corpo} \cdot h_{total}}{\rho_{fluido}} \quad (4.4)$$

Nas tabelas 4.2 e 4.3 apresentam-se as propriedades dos materiais e características de cada componente, utilizadas para calcular a altura submersa dos conjuntos da estrutura (plataforma, tampa, parafusos e tubos bobinados) e dos módulos (boia inferior, boia de transporte, íman e anel de fixação). De notar na tabela que se considerou um íman de ferrite com 17 milímetros de diâmetro e 5 milímetros de altura para iniciar estes cálculos.

Tabela 4.2: Densidades dos materiais definidos para construção do protótipo.

Material	ρ (kg/m ³)
Água (15°C)	998,57
Pe-hd	960
PVC	2255,9
PLA	1240

Tabela 4.3: Características mássicas e volúmicas dos componentes necessárias ao cálculos das densidades médias dos dois conjuntos de componentes que constituem o protótipo.

	Componentes	Volume			Massa		Densidade	
		Volume material [mm ³]	Volume oco [mm ³]	Volume total [mm ³]	Massa material [kg]	Massa de ar [kg]	Massa total [kg]	Densidade média [kg/m ³]
Estrutura	Plataforma	575233,1	1224766,9	1762185,6	0,55222	0,00149	0,81110	460,3
	Tampa	150000			0,144			
	Tubo para bobinar	2075,2	11047,9		0,00468	0,00001		
	Parafuso				0,00416			
	Vedante				pesar			
Módulo	Íman	565,5		60714,5	0,00275	0,000008	0,02289	386,2
	Boia de transporte	4187,1	6437,5		0,00402			
	Anel de fixação	1033,9			0,00099			
	Anel de apoio à montagem	857,7	0,00082					
	Perno roscado				0,000967			
	Boia inferior	5283,8	10263,6	15547,4	0,00655	0,000012	0,006562	



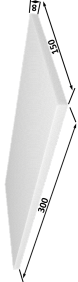



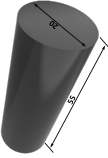



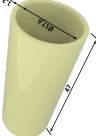





Recorrendo à expressão 4.4 e considerando a estrutura total como um retângulo de altura 68 milímetros, calcula-se a altura submersa como mostra a equação 4.5.

$$h_{SubmersaEstrutura} = \frac{460,28 \cdot 0,068}{998,57} = 0,031[\text{m}] = 31[\text{mm}] \quad (4.5)$$

No módulo, como não se trata de uma geometria regular devido à diferença de diâmetros das diferentes boias, define-se um cilindro equivalente e uniforme com o mesmo volume que o módulo. Para facilitar os cálculos, definem-se as dimensões das boias (diâmetro 36 milímetros e altura 15 milímetros) e faz-se variar a sua espessura. Sabe-se

que a altura desde a boia inferior até à base do íman é de 76 milímetros, portanto, metade desta altura deve estar submersa de forma ao íman começar no meio do comprimento da zona bobinada, como já mencionado. Sabendo este valor, sabe-se que a massa da boia deve ser 0,0159 kg, o que corresponde a 1,5 mm de espessura da boia. Na tabela 4.3 já se encontram os valores para uma boia com 1,5 milímetros de espessura, o que corresponde a uma densidade média do módulo de 386,19 kg/m³. Por fim, todos os materiais necessários à construção do protótipo e componentes maquinados encontram-se na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Tabela resumo dos materiais e componentes adquiridos para a construção do protótipo e componentes finais maquinados.

Material	Dimensões	Quantidade	Descrição do componente	Quantidade de componentes	Componente
Componentes para maquinar		1	Plataforma	1	
		1	Tampa da plataforma	1	
		9	Boia superior	9	
		1	Anel de apoio à montagem	9	
		1	Anel de fixação do íman	9	
		1	Tubo para bobinar	9	
		1	Boia inferior	9	
Componentes existentes no mercado	16 x 22 x 5		Vedante de lábio	9	
	M6 x 30		Pino roscado de poliamida	9	
	M5 x 25		Parafuso cabeça hexagonal ISO 4017 - Grau A	4	

4.3.1 Projeto para Bobinagem

Um enrolamento, também designado por bobine, refere-se a várias espiras de um fio condutor elétrico que gera uma força eletromotriz induzida (ou tensão) quando exposto a um campo magnético variável. A bobine pode ser caracterizada pela sua indutância e resistência do fio, que podem ser calculadas segundo as expressões 4.6, 4.7 e 4.8, onde R é a resistência elétrica do fio, ρ_{elec} é a resistividade elétrica, l_{fio} é o comprimento total do fio, A_{SecFio} é a área da secção transversal do fio, L_{bobina} a indutância da bobine, μ a permeabilidade do núcleo, N é o número de espiras e $A_{SecBobine}$ é a secção transversal da bobine. A força eletromotriz ε pode ser descrita pela equação 4.8, a qual mostra uma relação de proporcionalidade direta com a indutância, onde i representa a corrente e t o tempo. Assim sendo, procura-se maximizar a indutância. Por outro lado, a resistência elétrica do fio deve ser mínima de forma a diminuir a oposição de passagem à corrente.

$$R = \frac{\rho_{elec} \cdot l_{fio}}{A_{SecFio}} \quad (4.6)$$

$$L_{bobine} = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot A_{Secbobine}}{l_{fio}} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon = L_{bobine} \cdot \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad (4.8)$$

No desenvolvimento do protótipo projetou-se um tubo removível (figura 4.13a) para acomodar o enrolamento. Neste tubo desbastou-se 0,5 milímetros em todo o seu diâmetro e numa altura de 40 milímetros como indicado no anexo B, para definir a zona a bobinar. Com base no formato do tubo bobinado procede-se ao projeto da bobine, o qual deve ter em consideração os parâmetros mencionados anteriormente (resistência do fio e indutância). O espaço da zona da bobine deverá ser aproveitado ao máximo, portanto resta definir o diâmetro do fio de cobre a utilizar. Os diâmetros viáveis para o projeto variam de 0,1 mm a 0,5 mm e os valores do projeto para cada diâmetro encontram-se na tabela 4.5. Apesar do fio com diâmetro de 0,1 mm ter uma resistência bastante superior aos restantes, a indutância é também consideravelmente superior devido ao número de voltas possível, o que será um fator determinante na tensão gerada. Assim procedeu-se à bobinagem do tubo utilizando fio de cobre com diâmetro de 0,1 mm, cujo projeto final se encontra ilustrado na figura 4.13.



(a) Ilustração do tubo para bobinar.



(b) Ilustração do tubo bobinado.

Figura 4.13: Imagens do tubo utilizado para bobinar e do tubo bobinado de acordo com o projeto.

Tabela 4.5: Valores utilizados nos cálculos da resistência do fio e indução magnética, para os diferentes diâmetros de fio de cobre existentes no mercado.

$D_{fio}[mm]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\rho_{cobre}[\Omega.m]$	$\mu[H/m]$
$A_{SecFio}[mm^2]$	0,0079	0,03142	0,07069	0,12566	0,19635	$1,7 \cdot 10^7$	$1,26 \cdot 10^6$
N_{impar}	410	205	136	102	82		
N_{par}	409	204	135	101			
$N_{camadas}$	5	3	2	2	1		
N_{total}	2048	614	271	203	82		
$L_{fio}[mm]$	39826,25	12001,24	5300,1	3907,09	1599,00		
D1 [mm]	19,1	19,2	19,3	19,4	19,5		
D2 [mm]	19,27	19,55	19,82	19,092			
D3 [mm]	19,45	19,89					
D4 [mm]	19,62						
D5 [mm]	19,79						
D_{med} [mm]	19,45	19,55	19,56	19,25	19,5		
$R[\Omega]$	86,20	6,49	1,27	0,529	0,138		
$L[mH]$	0,5165	0,0469	0,00915	0,00497	0,00083		

4.4 Tanque de Ondas

Com vista a validar o protótipo e ser possível tirar conclusões do conceito desenvolvido, é necessário submete-lo a testes em meio aquático. Estes testes são, normalmente, feitos em tanques de ondas, os quais simulam ondas sinusoidais regulares caracterizadas por um período de onda e uma altura de onda. Apesar das condições marítimas não se aproximarem de uma onda sinusoidal bem definida, esta é a melhor forma de estudar os protótipos e obter resultados conclusivos. No entanto, existem alguns tanques capazes de gerar ondas irregulares, semelhantes ao estado do mar.

Em Portugal existem tanques de ondas, como é o caso no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa. Porém, estes tanques são de elevadas dimensões comparativamente ao protótipo desenvolvido. Assim, é necessário encontrar um tanque mais adequado às dimensões, assim como uma maior acessibilidade, de forma a proceder aos diferentes testes e análises do protótipo. Com base nos materiais disponíveis, o tanque utilizado é uma adaptação de um aquário de água quente, ilustrado na figura 4.14 juntamente com as suas dimensões.

Apesar de ser um tanque de fácil manutenção e controlo, as suas dimensões podem ser limitadoras. Como o comprimento é reduzido, o retorno das ondas no final do tanque pode afetar as ondas geradas em todo o comprimento do tanque e não apenas no final, como aconteceria num tanque de maiores dimensões.

A geração das ondas num tanque de pequena escala é geralmente feita recorrendo a uma dos três métodos seguintes: uma placa perpendicular à superfície da água, com movimentos de translação paralelos à direção das ondas (figura 4.15a); uma placa perpendicular à superfície da água com movimentos de rotação em torno de um eixo perpendicular à direção das ondas (figura 4.15b); um bloco com base paralela à superfície da água e movimentos de translação perpendiculares a essa superfície (figura 4.15c).

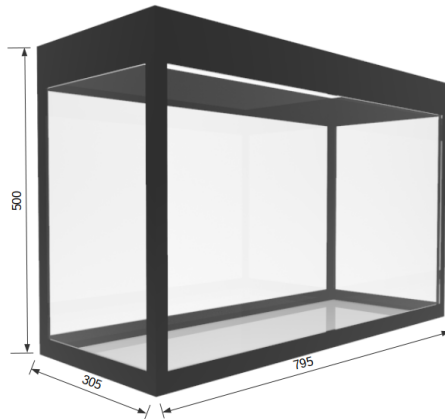


Figura 4.14: Ilustração do aquário e respectivas dimensões (em mm).

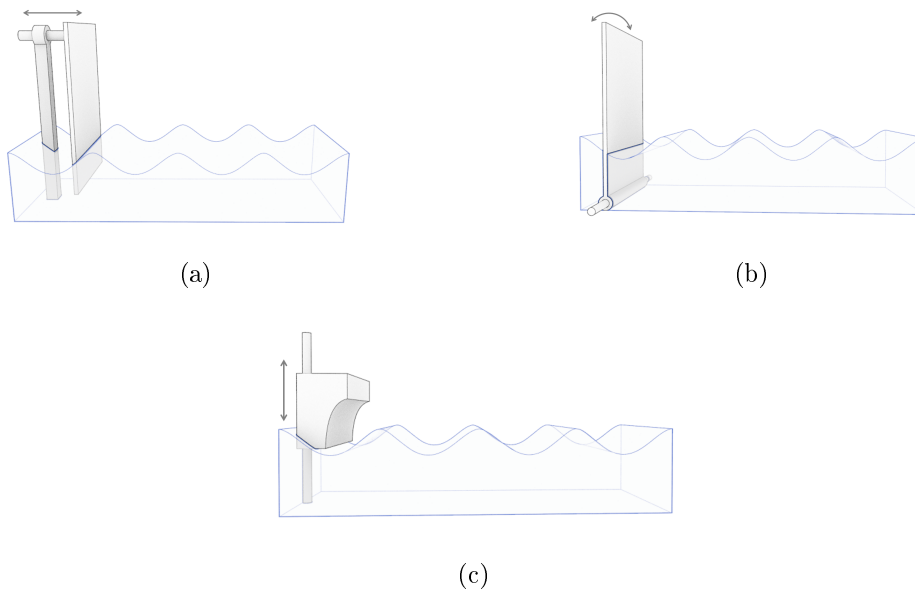
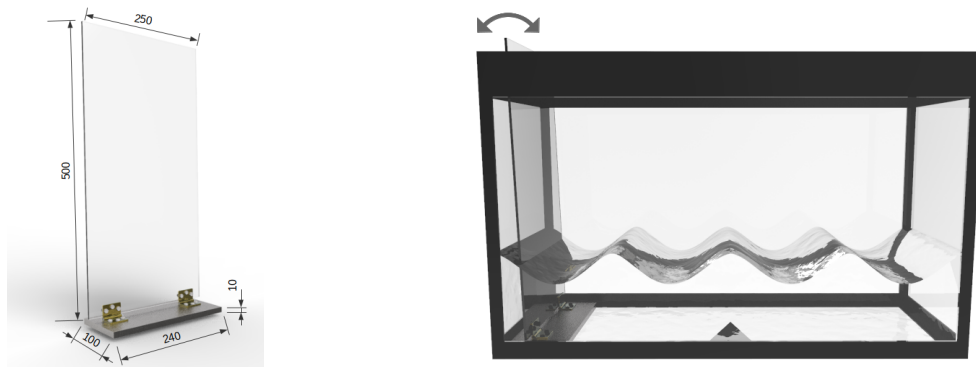


Figura 4.15: Esboços de possíveis mecanismos de geração de ondas num tanque de testes.

No presente trabalho optou-se pelo segundo mecanismo (figura 4.15b), sendo que este exige uma menor força aplicada na placa e trata-se de um sistema facilmente concretizável. Assim, tendo por base o funcionamento desse sistema, projetou-se uma placa de acrílico com 4 mm de espessura para movimentar a água e um bloco de base, mais denso que a água, para servir de suporte ao sistema, ambos os componentes encontram-se dimensionados na figura 4.16a. De forma a conceder o movimento rotacional à placa, colocaram-se duas dobradiças fixas ao bloco e à placa por parafusos e porcas. O projeto do sistema completo e modo de funcionamento encontra-se na figura 4.16b. Como material para a base utilizou-se ferro, contudo teria vantagens maquinar a base num material diferente, para efeitos de durabilidade em ambiente aquático.

O projeto apresentado prevê uma utilização manual, no entanto poderia ser automatizado, de forma a possibilitar a geração de ondas com períodos e alturas precisas e consistentes ao longo do teste. O projeto de um sistema semelhante a uma cambota



(a) Ilustração do projeto e dimensões do mecanismo de geração de ondas.

(b) Ilustração do funcionamento do mecanismo de geração de ondas no tanque.

Figura 4.16: Projeto do mecanismo de geração de ondas.

movimentada por um motor de corrente contínua foi desenvolvido, com objetivo de ser impresso em PLA por impressão 3D. Contudo, o objetivo dos primeiros testes é maioritariamente funcional, não sendo necessário proceder à automatização.

Após concretização do mecanismo projetado na figura 4.16a, realizaram-se alguns testes ao mecanismo de geração de ondas. Nestes testes, encheu-se o tanque com um nível de água de aproximadamente 115 mm e colocou-se o gerador numa das extremidades. Considera-se que um curso completo do gerador é de 110 milímetros, ou seja, 75 milímetros para cada lado a partir da sua posição vertical. Realizaram-se dois testes: no primeiro aproximou-se o período de oscilação a período de oscilação a 0.5 segundos. Com intuito de obter resultados mensuráveis, utilizaram-se duas fitas métricas paralelas ao comprimento e altura do tanque (figura 4.17). Com base nestas fez-se a conversão de pixels para milímetros e assinalaram-se múltiplos pontos ao longo da superfície da água, como ilustra a figura 4.18. A partir destes pontos obtiveram-se os gráficos que se encontram nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21.



Figura 4.17: Exemplo de uma superfície de água em estudo.

Comparando os gráficos relativos aos tempos de período de oscilação de 1 segundo e 0,5 segundos, deduz-se que as ondas geradas por um período menor são ondas com maiores perturbações à superfície e menos regulares que as ondas geradas com maior período. Na tabela 4.6 apresentam-se os valores da altura e comprimento de onda para a maior onda em cada instante em estudo nos gráficos, assim como os valores médios para cada período de oscilação. Pela análise da tabela infere-se que as ondas geradas pelo menor período de oscilação do gerador têm alturas maiores e comprimentos de onda ligeiramente mais pequenos e ondas menos consistentes.

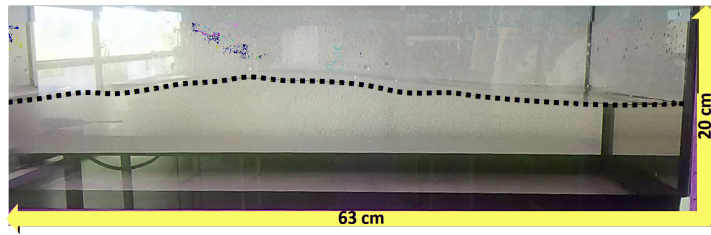


Figura 4.18: Esquema representativo da marcação dos pontos e das dimensões da zona de estudo do tanque.

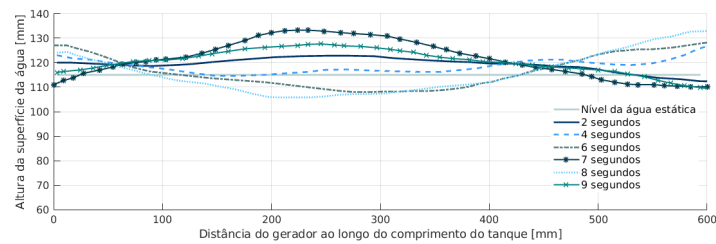


Figura 4.19: Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 1 segundo.

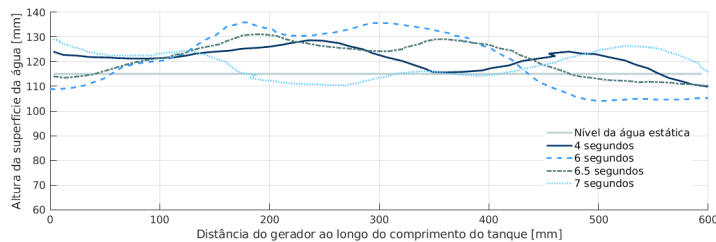


Figura 4.20: Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 0,5 segundos, desde o início de geração até 7 segundos.

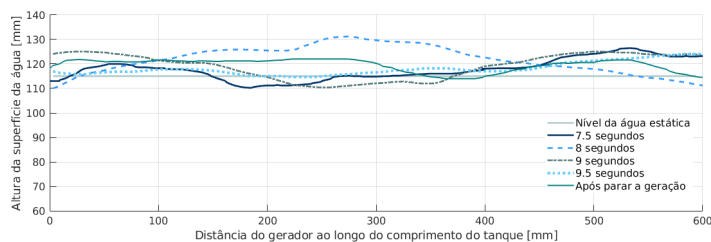


Figura 4.21: Perfil da água do tanque ao longo do tempo, gerada com um período de oscilação de 1 segundos, até ao final da geração.

Ao longo dos testes confirmou-se o problema já esperado, relativo à interferência do retorno das ondas. Para além disso, uma outra fonte de inferências provém da folga entre a largura da placa e a largura do tanque.

Tabela 4.6: Valores de altura e comprimento de onda nos vários instantes estudados, e valores médios calculados.

	Tempo de geração	H [mm]	λ [mm]		Tempo de geração	H [mm]	λ [mm]
Curso 1 segundo	2	12	606,06	Curso 0.5 segundos	4	20	251,57
	4	9	289,01		6	33	405,12
	6	22	630,3		6.5	23	530,32
	7	25	745,46		7	20	592,91
	8	31	745,46		7.5	17	605,91
	9	20	787,88		8	24	647,24
					9	15	457,09
					9.5	10	726,38
					Após geração	8	305,91
Valores médios		20	634,03			18,89	502,49

Capítulo 5

Modelação Numérica

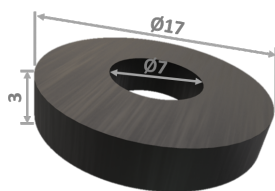
Uma parte importante do processo de desenvolvimento de qualquer mecanismo ou estrutura passa pela sua modelação numérica. Os resultados da modelação numérica permitem melhorar o protótipo antes de proceder à parte experimental assim como ter uma maior sensibilidade aos resultados dos testes experimentais. No caso deste protótipo modelaram-se numericamente os campos magnéticos dos ímanes assim como a dinâmica das boias dos módulos.

5.1 Simulação do Campo Magnético

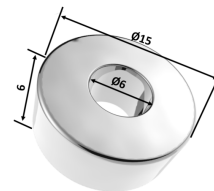
O campo magnético é um dos parâmetros principais ao cálculo do potencial de energia do sistema. Existem dois ímanes disponíveis para utilização nos módulos do protótipo: ímanes de ferrite e ímanes de neodímio, cujas dimensões se encontram na figura 5.1a e na figura 5.1b, respetivamente.

Começou-se por simular o campo magnético de cada de íman individualmente e, seguidamente, alinharam-se três ímanes: um íman de ferrite e dois ímanes de neodímio. A simulação destes campos foi feita com recurso ao *software* FEMM e os resultados encontram-se na figura 5.2.

Tendo em conta que o campo magnético varia significativamente na sua distribuição espacial, importa definir uma zona de interesse. Enquadrando com os valores posteriormente necessários aos cálculos do potencial do protótipo, define-se como zona de estudo a zona da bobina no comprimento do íman. Recorrendo ao mesmo *software*, FEMM, obtém-se os valores do campo magnético para esta zona de estudo, para as três configurações simuladas: os ímanes isolados (gráficos das figuras 5.3a e 5.3b) e a

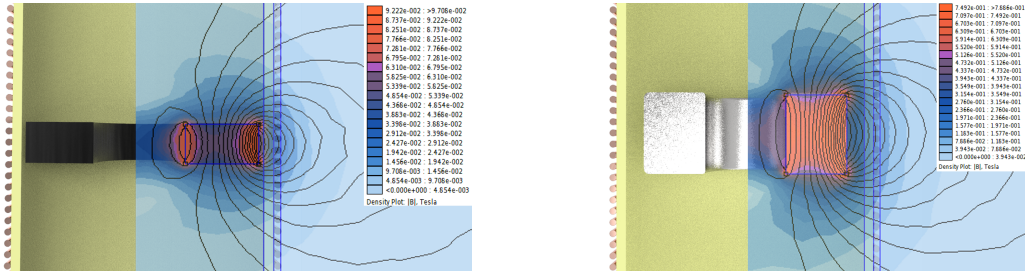


(a) Dimensões dos ímanes de ferrite.



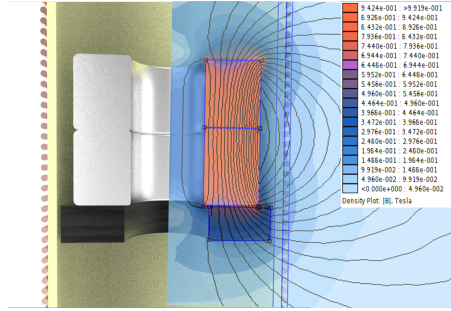
(b) Dimensões dos ímanes de neodímio.

Figura 5.1: Dimensões dos ímanes disponíveis para utilização no protótipo.



(a) Distribuição do campo magnético gerado pelo íman de ferrite.

(b) Distribuição do campo magnético gerado pelo íman de neodímio.



(c) Distribuição do campo magnético gerado pelos três ímanes.

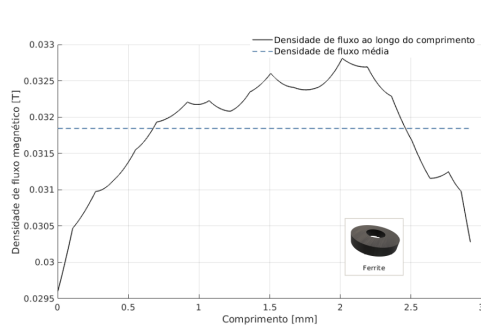
Figura 5.2: Resultados da simulação do campo magnético gerado para os três primeiros casos de estudo.

disposição de um íman de ferrite juntamente com dois ímanes de neodímio (gráfico da figura 5.3c). Com os valores do gráfico calculam-se valores médios de campo magnético na zona de estudo, sendo estes 0,0304 Tesla para o íman de ferrite, 0,1674 Tesla para o íman de neodímio e 0,1724 para a junção dos três ímanes. Os três ímanes tem um campo magnético médio 2,9% superior ao campo médio do íman de neodímio.

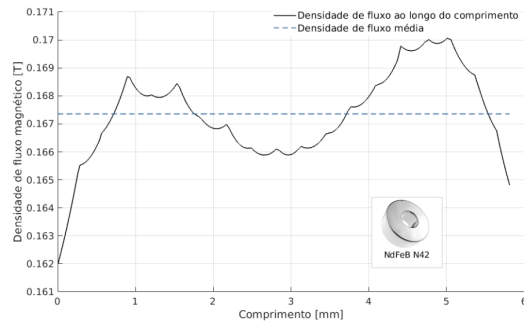
Como seria de esperar, a melhor solução seria a da combinação dos três ímanes. No entanto, apesar do campo magnético parecer desprezável na zona de raio superior ao da bobina, na prática, o campo magnético de um módulo interfere com o campo magnético do módulo mais próximo, o que afeta o movimento dos dois módulos. Assim, avaliou-se a solução de um íman de ferrite e um íman de neodímio dispostos consecutivamente. Esta configuração é a configuração que permite um campo magnético maior ao mesmo tempo que não interfere com o campo magnético do módulo mais próximo. Na figura 5.4 encontra-se a distribuição da densidade de fluxo magnético no espaço, seguida da densidade de fluxo magnético ao longo da zona da bobina na figura 5.5. Os dois ímanes geram na zona da bobina uma densidade de fluxo média de 0,1695 Tesla.

5.2 Modelação Dinâmica dos Módulos

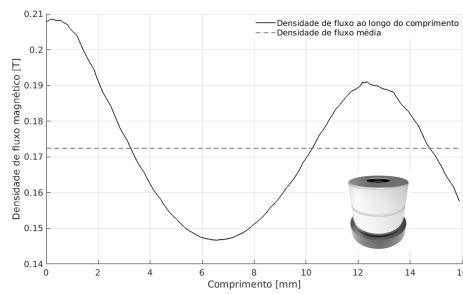
A energia gerada por cada módulo está dependente do seu movimento, o qual é motivado pelo movimento das ondas, mas não é o mesmo. Previamente à modelação dos módulos, modela-se o movimento das ondas. Considerando que no tanque de ondas se geram ondas sinusoidais regulares, recorre-se à expressão 5.1 que descreve a elevação da



(a) Gráfico dos valores de campo magnético gerado pelo íman de ferrite na zona de estudo.



(b) Gráfico dos valores de campo magnético gerado pelo íman de neodímio na zona de estudo.



(c) Gráfico dos valores de campo magnético gerado pelos três ímanes na zona de estudo.

Figura 5.3: Gráficos dos valores de campo magnético na zona da bobina ao longo do comprimento dos ímanes e respetivos campos médios.

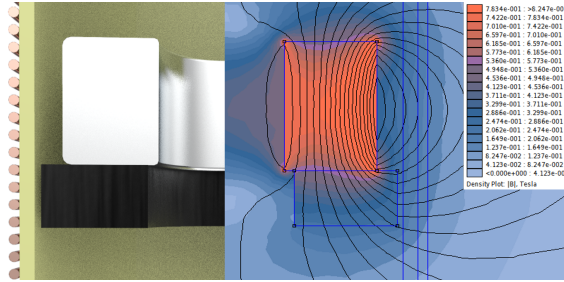


Figura 5.4: Distribuição do campo magnético gerado pelos dois ímanes.

superfície da onda sinusoidal com a evolução do tempo, onde A representa a amplitude da onda, w a frequência angular e t o tempo.

$$\eta = -A \cdot \sin(w \cdot t) \quad (5.1)$$

Uma boia a flutuar na água terá um movimento distinto do movimento da onda, dependendo das suas características e peso. Para simplificar a modelação considera-se apenas o movimento vertical do módulo, sendo este um pressuposto viável, já que no protótipo o movimento vertical é o único que gera energia. Para além disso considera-se que o módulo tenha zonas de guiamento suficientes para impedir movimentos ao longo de

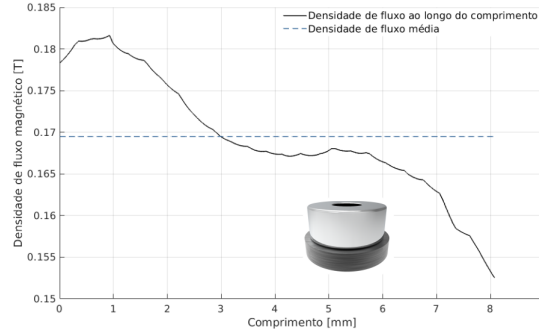


Figura 5.5: Gráfico dos valores de campo magnético gerado pelos dois ímanes na zona de estudo.

outros eixos. Um corpo em suspensão num líquido terá quatro forças a atuar sobre ele: o peso (F_P), uma força de impulsão (F_I), uma força dinâmica (F_D) e uma resistência hidráulica (F_H), como ilustra o esquema da figura 5.6. Com base na Segunda Lei de Newton, estabelece-se a equação do movimento do módulo indicada na expressão 5.2.

$$F_P = F_I + F_D + F_H \quad (5.2)$$

A força do peso será o produto da massa pela aceleração (equação 5.3). A força de impulsão é igual ao peso da massa de água deslocada pela boia, também denominada por Princípio de Arquimedes (equação 5.4). A força dinâmica está relacionada com a diferença de velocidade entre as partículas de água e a boia, podendo ser obtida pela equação equação 5.5, e a resistência hidráulica provém da resistência que a coluna de água abaixo da boia oferece ao seu movimento (equação 5.6) [75]. A constante m representa a massa do módulo, h o deslocamento vertical do módulo, ρ_{fluido} a densidade do líquido em que a boia está imersa, g a aceleração da gravidade, V_{desl} o volume de água deslocado pela parte submersa do módulo, S a superfície inferior da boia, ζ a elevação da superfície da água, C_I o coeficiente de inércia, m_{desl} a massa de água deslocada pelo módulo, \dot{u} a velocidade relativa entre as partículas do líquido e o módulo, h_0 a altura da bóia submersa

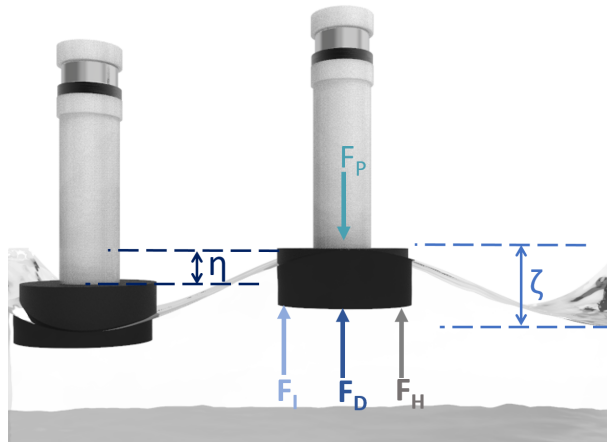


Figura 5.6: Esquema das forças que atuam no módulo.

com a água em estado estacionário, W a aceleração vertical da água, e C o coeficiente de amortecimento.

$$F_P = m \cdot \frac{\partial^2 h(t)}{\partial t^2} \quad (5.3)$$

$$F_I = \rho_{líquido} \cdot g \cdot V_{dest} = \rho \cdot g \cdot S \cdot (\eta(t) - h(t)) \quad (5.4)$$

$$F_D = C_I \cdot m_{dest} \cdot \dot{u}_{rel} = C_I \cdot \rho_{mod} \cdot S \cdot [\zeta(t) - h(t) + h_0] \cdot \frac{\partial}{\partial t} (W(t) - \frac{\partial h(t)}{\partial t}) \quad (5.5)$$

$$F_H = -C \cdot \frac{\partial h(t)}{\partial t} \quad (5.6)$$

$$C = 0,1 \cdot (1 + e^{0,25 \cdot (t-7)^2}) \quad (5.7)$$

Substituindo as forças pelas respectivas expressões na equação da dinâmica do módulo (equação 5.2) obtém-se a equação diferencial de segundo grau (equação 5.8). Com o intuito de encontrar a equação que define a posição do módulo ao longo do tempo, resolve-se a equação em função de $h(t)$. Para resolver a equação diferencial recorreu-se ao *software* Matlab. O coeficiente de amortecimento varia com o tempo de acordo com a expressão 5.7 determinada por J.S.Tang et al [76]. O coeficiente de inércia pode ser aproximado a 2 quando o seu número de Keulegan-Carpenter (KC) é menor do que 7. Este número, em ondas sinusoidais, pode ser aproximado à expressão 5.9, onde A representa a amplitude das ondas e D_{cil} o diâmetro do cilindro. No caso do KC ser maior do que 7, pode-se calcular o coeficiente de inércia recorrendo à expressão 5.10, onde C_m representa o coeficiente de massa hidrodinâmico [77].

$$m \cdot \frac{\partial^2 h(t)}{\partial t^2} = \rho \cdot g \cdot S \cdot (\eta(t) - h(t)) + C_I \cdot \rho_{mod} \cdot S \cdot [\zeta(t) - h(t) + h_0] \cdot \frac{\partial}{\partial t} (W(t) - \frac{\partial h(t)}{\partial t}) - C \cdot \frac{\partial h(t)}{\partial t} \quad (5.8)$$

$$KC = \frac{2 \cdot \pi \cdot A}{D_{cil}} \quad (5.9)$$

$$C_I = 1 + C_m \quad (5.10)$$

Com o intuito de simular a potência do protótipo, calculou-se a corrente de acordo com a lei de Kirchoff para o circuito representativo de um gerador. A expressão resultante encontra-se na equação 5.11 onde i representa a corrente, R_l a resistência de carga, R_i a resistência interna, α o coeficiente de acoplamento eletromecânico e $\dot{\eta}$ a velocidade do íman. O coeficiente α pode ser obtido pelo produto do campo magnético B , número de voltas N e comprimento da bobina l_{bobine} como ilustra a equação 5.12. Por fim, para calcular a potência utilizou-se a expressão.

$$i \cdot (R_l + R_i) + \alpha \cdot \dot{\eta} = 0 \Leftrightarrow i = -\frac{\alpha}{R_l + R_i} \dot{\eta} \quad (5.11)$$

$$\alpha = N \cdot B \cdot L_{bobina} \quad (5.12)$$

$$P = i^2 \cdot R_l \quad (5.13)$$

Tendo em conta os valores obtidos na simulação do campo magnético, a nova configuração de ímanes assim como a futura alteração à boia inferior (ver secção 6.1), alteraram-se os valores das massas e densidades do módulo apresentados na tabela 4.2. Os novos valores encontram-se na tabela 5.1. Com estes valores apresentam-se na tabela 5.2 o valor das constantes utilizadas na simulação da dinâmica do protótipo. Na tabela encontram-se as constantes utilizadas no cálculo da potência.

Tabela 5.1: Valores corrigidos da massa e densidade do módulo, de acordo com as alterações feitas a partir das simulações teóricas e erros funcionais nos ensaios.

	Componentes	Volume material [mm ³]	Volume oco [mm ³]	Volume total [mm ³]	Massa material [kg]	Massa de ar [kg]	Massa total [kg]	Densidade média [kg/m ³]
Módulo	Íman de ferrite	565,49			0,002750			
	Íman de neodímio	890,65			0,068000			
	Boia de transporte	4187,05	6437,52		0,0040196	0,0000078		
	Anel de fixação	1033,94		0,0000578	0,0009927		0,016094	238,74
	Anel de apoio à montagem	857,65			0,0008233			
	Perno roscado				0,000967			
	Boia inferior de PE	44704,86			0,0005141			

Tabela 5.2: Constantes utilizadas na simulação numérica do módulo.

Cálculo da dinâmica	Constantes	m [kg]	ρ [kg/m ³]	g [m/s ²]	S [m ²]	ρ_{mod} [kg/m ³]	h_0 [m]	C_I
	Valor	0,016094	998,57	9,81	0,004072	386,19	0,012	2
Cálculo da potência	Constantes	R_l [M Ω]	R_i [Ω]	N	B [T]	L_{Bobina} [m]		
	Valor	1	86,20	2048	0,1695	0,041		

Finalmente, com intuito de simular numericamente o comportamento hidrodinâmico e energia fornecida pelo protótipo, consideram-se os dois casos de condições de testes apresentados na secção 4.4: ondas geradas com período de aproximadamente 1 segundo e ondas mais frequentes com período de 0,5 segundos. As características relativas às condições de teste são as mesmas apresentadas na tabela 4.6. Os resultados relativos ao deslocamento do módulo encontram-se nas figuras 5.7 e 5.8, e os resultados da tensão e potência encontram-se nas figuras 5.9 e 5.10. Em ambos os casos considera-se a plataforma estática.

Partindo dos valores obtidos através da simulação numérica, calcularam-se os valores médios de cada variável para os dois casos de perfil de teste. Estes valores são apresentados na tabela 5.3, onde \bar{L}_{curso} representa o curso médio percorrido pelo módulo, $L_{CursoMax}$ o curso máximo percorrido, $L_{CursoMin}$ o curso mínimo, \bar{U} a tensão média, \bar{P} a potência média e $\bar{P}_{plataforma}$ a potência média dos nove módulos da plataforma por unidade de área. A potência média foi calculada de acordo com a expressão 5.14, onde T_t representa o tempo total de teste, neste caso os 10 segundos simulados.

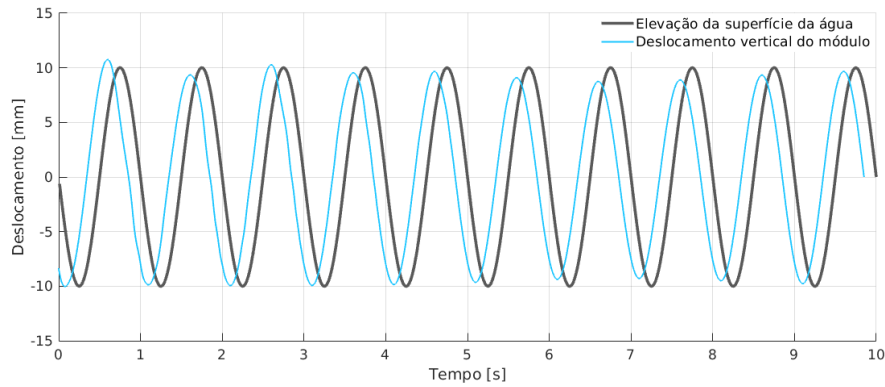


Figura 5.7: Gráfico da posição do módulo simulada numericamente para uma onda sinusoidal de 1 s de período e 20 mm de altura.

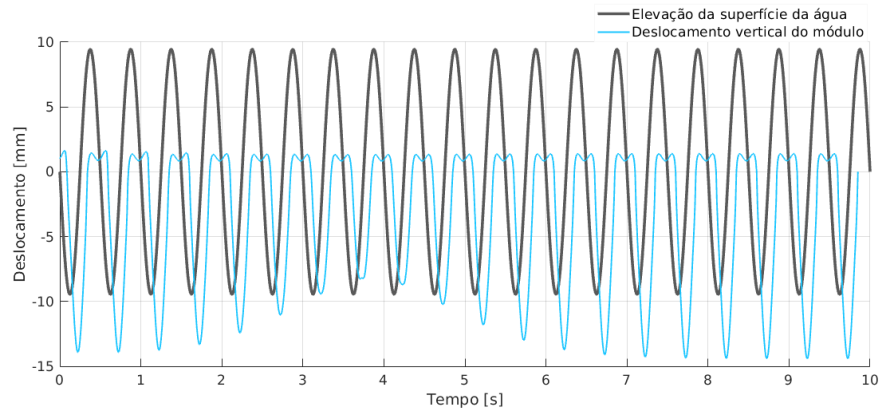


Figura 5.8: Gráfico da posição do módulo simulada numericamente para ondas sinusoidais de 0,5 s de período e 18,89 mm de altura.

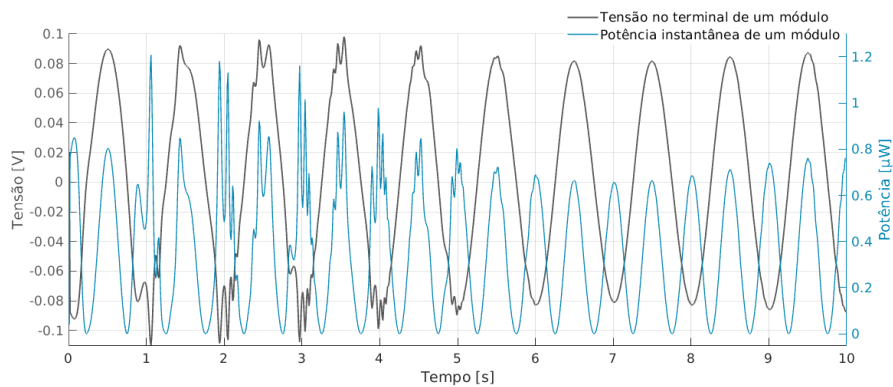


Figura 5.9: Gráfico dos resultados da simulação da tensão e potência de um módulo para ondas sinusoidais de 1 s de período e 20 mm de altura.

$$\bar{P} = \frac{1}{T_t} \cdot \int_0^{T_t} P(t) dt \quad (5.14)$$

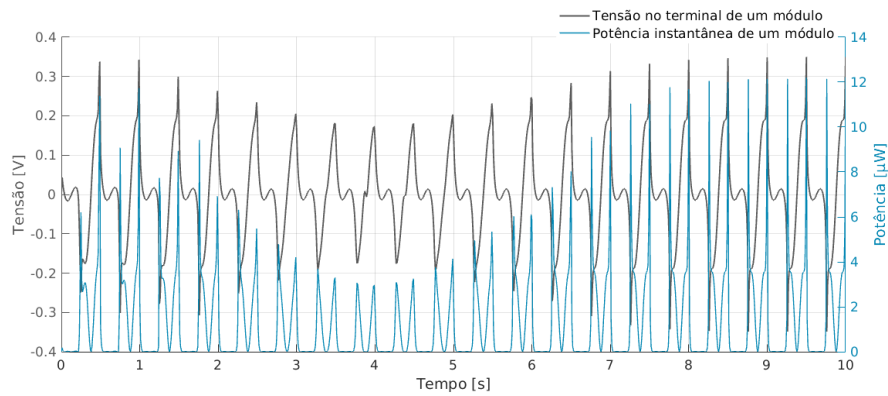


Figura 5.10: Gráfico dos resultados da simulação da tensão e potência de um módulo para ondas sinusoidais de 0,5 s de período e 18,89 mm de altura.

Tabela 5.3: Valores médios dos resultados numéricos para os dois perfis de ondas de teste.

Perfil das ondas de teste	$\bar{L}_{curso}[mm]$	$L_{CursoMax}[mm]$	$L_{CursoMin}[mm]$	$\bar{U} [V]$	$\bar{P} [\mu W]$	$\bar{P}_{plataforma} [mW/m^2]$
T= 1 s	19,2388	20,7638	18,1066	0,0548	0,3735	0,075
T=0,5 s	6,9303	15,5640	0,04513	0,0790	1,2479	0,25

Capítulo 6

Ensaaios Experimentais e Resultados

6.1 Ensaaios Funcionais de Estrutura e Evolução do Protótipo

A partir do projeto e materiais indicados na secção 4.3 construiu-se o protótipo, inicialmente com apenas um módulo para o avaliar funcionalmente. Começou-se por detetar um problema dos vedantes projetados para impedir que a água se infiltra na zona da bobina: o contato dos vedantes com o movimento axial dos módulos apresentava demasiado atrito. A força a atuar nas boias, resultante das ondas, é insuficiente para contrariar o atrito e induzir movimento nos módulos. Uma possível solução seria introduzir *o-rings* abaixo da bobina, no entanto, essa zona tem 21 mm de diâmetro, o qual não se encontra nas dimensões normalizadas. Como solução rápida fixaram-se as bobinas com recurso a silicone, o qual atua como vedante.

Após alguns segundos de se iniciar o teste, o módulo não acompanhava o movimento das ondas, o que resultou da entrada de água na boia de PLA. Para além disso, no início do teste, verificou-se que o módulo não tinha a impulsão necessária para percorrer todo o curso. Com o intuito de corrigir este problema alteraram-se as dimensões da boia de PLA de forma a diminuir a densidade total do módulo e consequentemente aumentar a impulsão. A nova boia tem um diâmetro de 40 milímetros e altura de 36 milímetros. Relativamente ao problema da infiltração da água imprimiram-se diferentes boias variando a sua espessura e e densidade de impressão ρ , como mostra o esquema da figura 6.1. Para a variação de densidade manteve-se a espessura de 1,5 milímetros e, seguidamente, variou-se a espessura mantendo a maior densidade (20%).

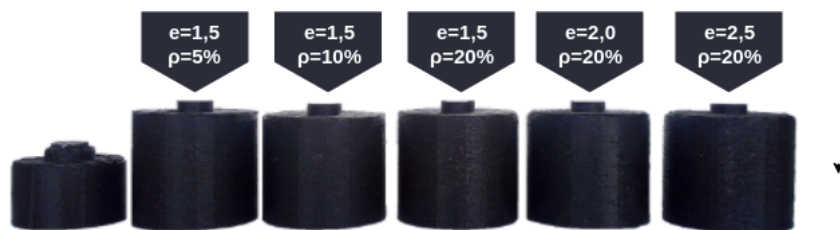


Figura 6.1: Ilustração das várias boias com indicação das diferentes espessuras e densidades.

As diferentes boias foram testadas e todas apresentaram infiltração de água ao fim de algum tempo ao longo de testes. De forma a resolver o problema optou-se por alterar o material das boias para um material de baixa densidade, fácil de maquinar e impermeável. Com base nestas características optou-se por maquinar as nove boias em poliestireno expandido, de acordo com o desenho técnico indicado no Anexo B. Substituindo as boias de PLA pelas novas boias de poliestireno obtém-se os módulos representados na figura 6.2.



Figura 6.2: Ilustração do módulo com a boia de poliestireno expandido.

Seguidamente realizaram-se testes do protótipo com os módulos e encontraram-se imediatamente problemas devido à elevada impulsão das boias de poliestireno: impossibilitou a submersão da plataforma já que as boias atuavam como fluturadores para a plataforma no fim do seu curso. Para além disso a plataforma não é simétrica ao longo da sua largura, ou seja, estão dispostas cinco boias num dos lados e quatro boias no outro, o que levou ao adernamento da plataforma, como se vê na figura 6.3.

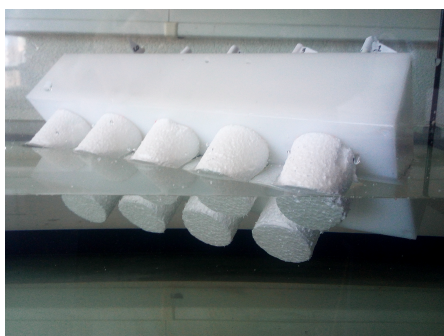


Figura 6.3: Imagem do protótipo adernado após introdução das boias de poliestireno extrudido.

Com o intuito dos módulos se encontrarem na posição média do percurso, tendo em conta a elevada impulsão, é necessário que a plataforma se encontre a uma determinada distância acima do nível da água. Esta alteração implica uma mudança do modo de funcionamento inicialmente projetado para o protótipo. Contrariamente ao conceito inicial em que a zona do curso (zona bobinada) se prolonga em quase toda a altura da plataforma, neste caso a zona do curso deverá estar acima do nível da água. Ou seja, é necessário incorporar algo análogo a uma caixa de ar abaixo da zona de curso. Atendendo ao facto da plataforma já se encontrar maquinada, é necessário adicionar material abaixo da plataforma para simular a caixa que deveria ter sido maquinada diretamente na

plataforma. Considerando os materiais disponíveis, recorreu-se novamente ao poliestireno expandido com uma densidade ligeiramente superior àquele utilizado na maquinagem das boias. Decidiu-se adicionar duas placas de poliestireno nos dois lados da plataforma em todo o seu comprimento. Recorrendo à expressão 4.4, recalcula-se a altura submersa do módulo e consequentemente a altura a que a plataforma se deve encontrar acima do nível da água. Com estes valores pretende-se encontrar o valor da altura total de poliestireno necessária de forma a que a altura acima da água corresponda à altura necessária.

Construída a nova configuração, procedeu-se aos testes funcionais, onde se numeraram as boias de acordo com a figura 6.4.

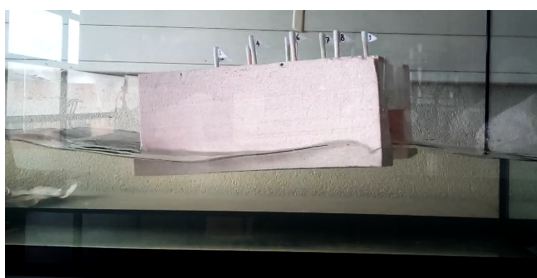


Figura 6.4: Ilustração da numeração dos módulos para os testes do protótipo com as placas de poliestireno.

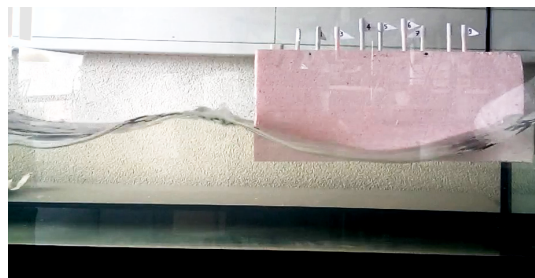
Durante os testes fizeram-se as seguintes observações:

- O módulo 4 tem um maior atrito que os restantes módulos e, consequentemente, encontra-se praticamente estático ao longo dos testes;
- Quando se geram ondas com menor frequência, dependendo da zona no tanque para onde a plataforma se desloca, algumas boias tem mais movimento. Tanto os módulos das extremidades (1, 2, 8 e 9) apresentam maior movimento relativamente aos restantes, como o inverso se verifica;
- Sendo a plataforma flutuante livre, ao fim de algum tempo o seu comprimento deixa de estar alinhado com a direção das ondas e o movimento dos módulos diminui.
- Na geração de ondas de menor frequência (maior tempo de curso do gerador e consequente maior comprimento de onda), a plataforma acompanha o movimento das ondas em vez de estar praticamente estática, como ilustrado na figura 6.5a. Consequentemente, o movimento dos módulos é praticamente nulo.

O protótipo composto pelas placas de poliestireno tem um peso bastante reduzido assim como o seu comprimento, o que não permite que a plataforma se mantenha estática. No caso de um plataforma construída à escala espera-se que tenha um peso tal que se mantenha estática relativamente aos módulos. De forma a simular esta situação podem-se adicionar apoios ao chão. Para adicionar estes apoios fizeram-se furos de 6 mm de diâmetro e utilizaram-se varões roscados M6. Como os furos não foram possíveis de roscar, adicionaram-se porcas hexagonais M6 para regular a altura a que a plataforma se encontra da superfície da água, como ilustrado na figura 6.6.



(a) Testes do protótipo com ondas de maior comprimento.



(b) Testes do protótipo com ondas de menor comprimento.

Figura 6.5: Imagens do comportamento do protótipo em testes com diferentes tamanhos de onda.



Figura 6.6: Ilustração do protótipo apoiado nos suportes roscados.

Para concluir os testes funcionais realizaram-se os testes com a plataforma apoiada nos pernos. Com estes testes verificou-se que para ondas de maior comprimento os módulos acompanham todos o movimento da onda, realizando praticamente o mesmo movimento no mesmo tempo, como mostra a figura 6.7.



(a) Imagem dos módulos no fim do curso, consequente do movimento da onda gerada.



(b) Imagem dos módulos no início do curso, consequente do movimento da onda gerada.

Figura 6.7: Imagens do comportamento do protótipo em testes com ondas de maior período (aproximadamente 1 segundo).

No caso da geração de ondas de menor comprimento, verificou-se que apenas o módulo situado na zona do pico de onda apresenta movimento (figura 6.8a). No caso

de se aumentar a frequência todas as boias apresentam movimento, no entanto não realizam todo o curso apesar da altura da onda ser semelhante à altura de onda de maior comprimento gerada (figura 6.8b).



(a) Imagem de um instante no teste do protótipo com apoios, pico superior de onda.



(b) Imagem de um instante no teste do protótipo com apoios, no pico inferior da onda.

Figura 6.8: Imagens do comportamento do protótipo em testes com ondas de menor período (aproximadamente 0,5 segundos).

De forma a terminar os testes funcionais, fez-se variar a direção do protótipo, colocando-se na diagonal à direção das ondas, como ilustra a figura 6.9, sendo que nos testes anteriores se encontrava alinhado com a direção da onda (e comprimento do tanque de teste). A diferente orientação não mostrou qualquer variante dos resultados, comparativamente com os resultados funcionais do protótipo alinhado com o comprimento de onda.



Figura 6.9: Imagem de um instante de teste da plataforma com orientação diferente à direção das ondas.

6.2 Ensaios de Avaliação de *Performance*

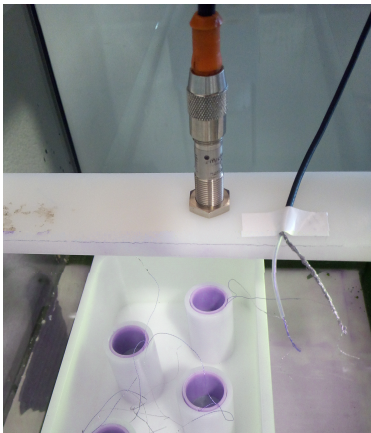
Terminados os ensaios funcionais e consequentes modificações, pretende-se avaliar se o protótipo gera energia possível de ser utilizada. Para estas medições deve-se ter em consideração a posição das boias ao longo do tempo, a aquisição de dados relativos ao potencial de tensão gerada no terminal das bobinas e passagem de corrente elétrica.

6.2.1 Estação de Testes

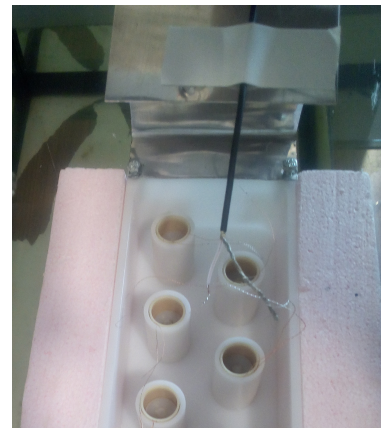
A estação de testes para avaliação do conceito é composta pelo mesmo tanque de ondas e gerador utilizados nos ensaios anteriores. Tal como nos ensaios anteriores, foi colocada uma fita métrica ao longo da altura do tanque para controlar a altura das ondas geradas. A medição do deslocamento das boias com o tempo é feita com recurso a um sensor Microsonic Nano 15/CU, o qual mede a distância a um objeto, com um alcance de 20 a 250 mm e um output entre 0 e 10 V. A calibração do sensor e aquisição dos dados foi feita com recurso a um código desenvolvido em Matlab, apresentado em *Modelling of an electromagnetic generator using Artificial Neural Networks* [78]. Recorrendo ao mesmo código e na mesma *interface*, é possível adquirir dados relativos os dados de tensão através de uma placa de controlo DS1102.

Os dados do deslocamento deverão ser adquiridos pelo sensor colocado paralelo à direção do movimento dos módulo, concêntrico ao módulo em estudo e a uma distância mínima de 20 mm de distância da zona superior do módulo. Para a fixação do sensor desta forma, maquinou-se um suporte retangular em Pe-hd, com a largura igual à largura do tanque para encaixar por pressão. No meio do suporte fez-se um furo com 12 mm de diâmetro, onde o sensor encaixa como se mostra na figura 6.10a.

Para o estudo do protótipo com as placas de poliestireno, é necessário implementar um suporte diretamente na plataforma, já que esta não se encontra estática ao longo dos testes como se concluiu nos ensaios funcionais. O suporte foi feito com recurso a uma chapa de alumínio e parafusos M5 para aparafusar na zona onde a tampa de protótipo encaixaria, como mostra a figura 6.10b.



(a) Imagem do sensor Microsonic Nano 15/CU apoiado no suporte e à direita o cabo de aquisição da tensão.



(b) Imagem do suporte desenvolvido em chapa de alumínio para os testes da plataforma livre.

Figura 6.10: Imagens da estação de testes.

6.2.2 Resultados Experimentais

Avaliou-se em primeiro o protótipo com os apoios ao fundo do tanque, o que implica uma plataforma completamente estática. Tendo em conta que existe apenas um sensor, em cada teste avaliou-se um módulo individual. Para os vários testes manteve-se a posição

da plataforma, a 460 mm do gerador. De acordo com a numeração apresentada na figura 6.4, testaram-se os módulos 1, 3 e 6. Definiu-se um período de testes de 60 segundos, onde nos primeiros 30 segundos se geraram ondas com curso de geração aproximado de 1 segundo e nos últimos 30 segundos geraram-se ondas com curso aproximado de 0,5 segundos. Os resultados dos ensaios encontram-se nas figuras 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14. A potência instantânea de cada módulo foi calculada a partir da tensão, recorrendo à expressão, onde se considerou uma resistência de carga de $10^6 M\Omega$. A potência média foi calculada de acordo com a expressão 5.14.

$$P(t) = \frac{U(t)^2 \cdot R_l}{(R_i + R_l)^2} \quad (6.1)$$

O protótipo com as placas de poliestireno também foi testado. Devido a estar livre e apresentar algum movimento, implementou-se um suporte na plataforma e adquiriu-se o movimento do módulo 9. Os gráficos dos resultados encontram-se nas figuras 6.17, 6.18 e 6.19.

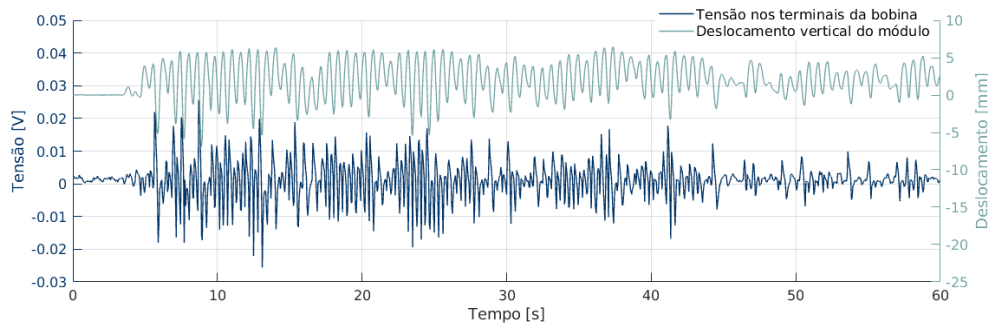


Figura 6.11: Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 1 durante o primeiro teste.

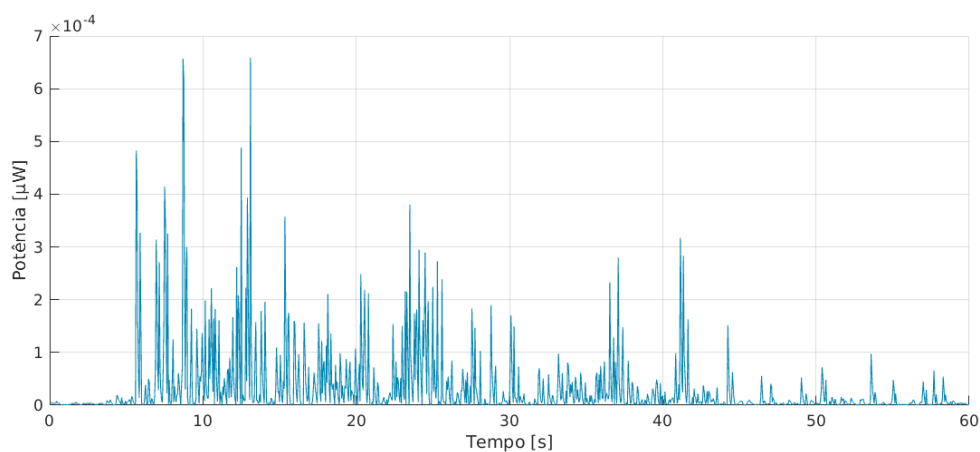


Figura 6.12: Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 1 durante o primeiro teste.

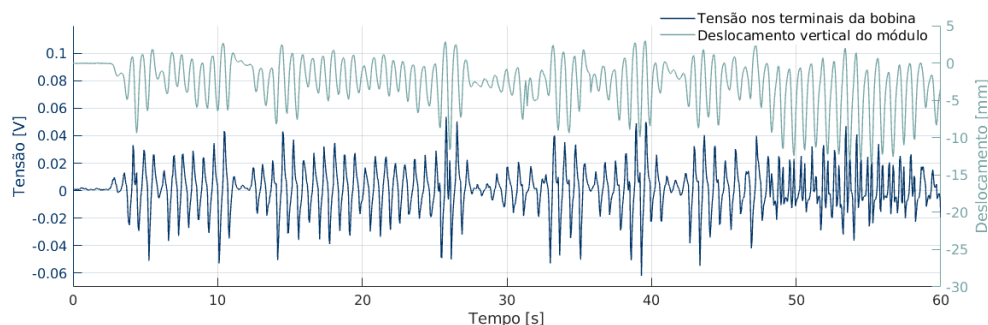


Figura 6.13: Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 3 durante o segundo teste.

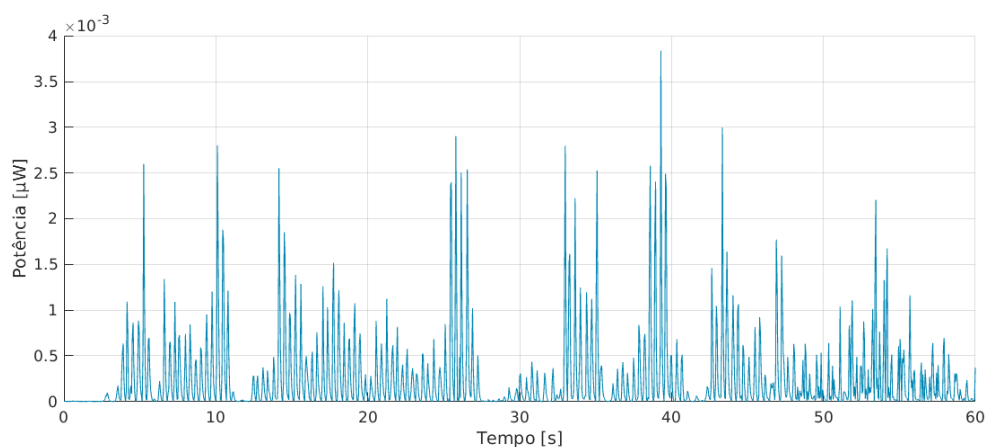


Figura 6.14: Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 3 durante o segundo teste.

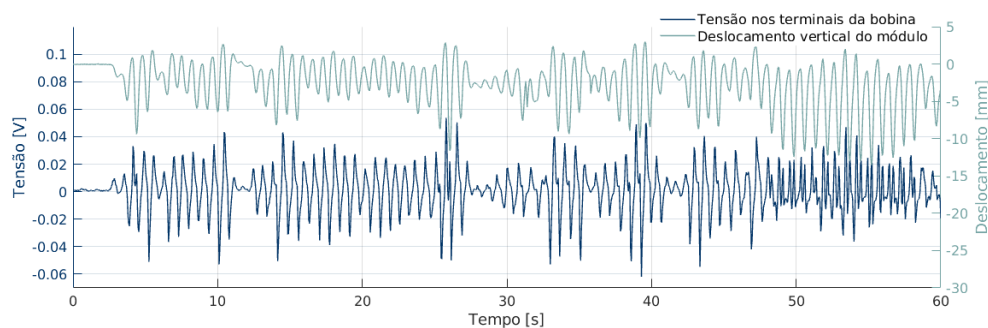


Figura 6.15: Gráfico dos valores lidos da posição e tensão do módulo 6 durante o terceiro teste da plataforma com apoios.

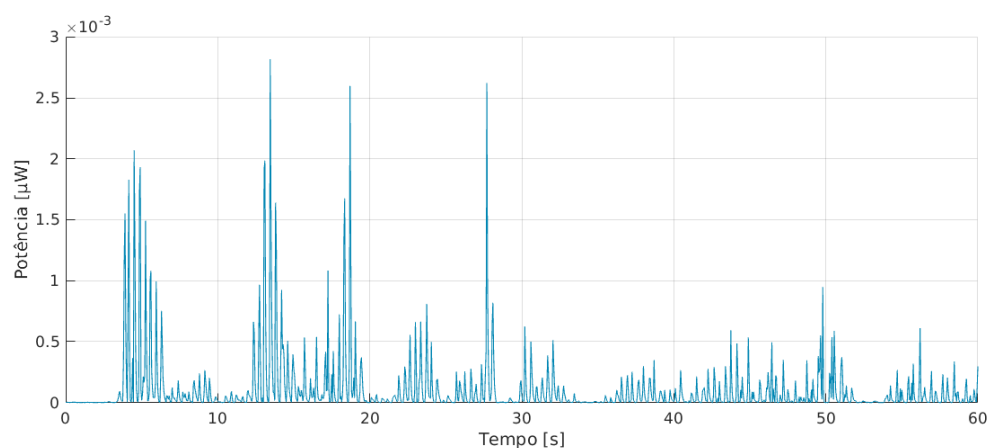


Figura 6.16: Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 6 durante o terceiro teste.

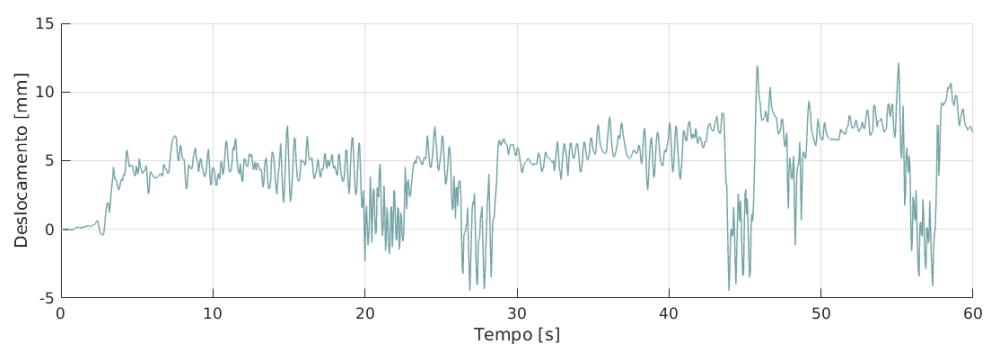


Figura 6.17: Gráfico dos valores lidos da posição do módulo 6 na plataforma livre com placas de poliestireno.

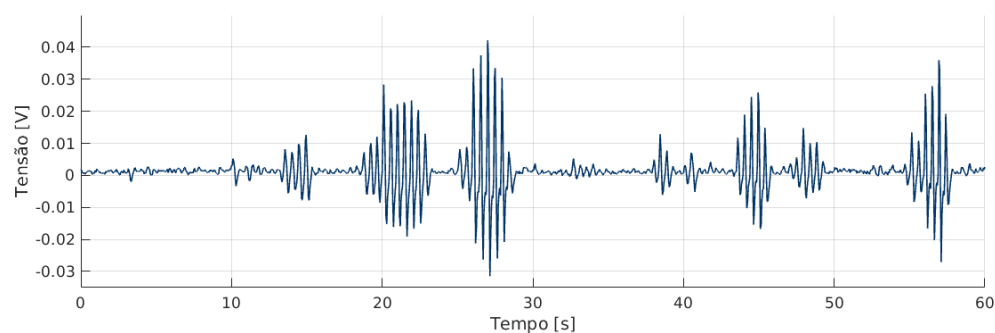


Figura 6.18: Gráfico dos valores lidos da tensão do módulo 6 durante o teste do protótipo livre.

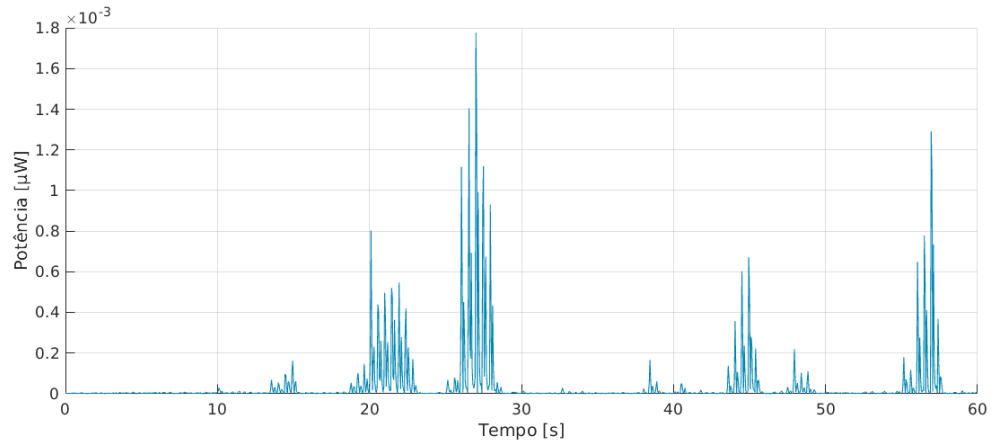


Figura 6.19: Gráfico dos valores calculados da potência do módulo 6 durante o teste do protótipo livre.

Tabela 6.1: Valores médios dos resultados experimentais.

	Tempo de teste	$\bar{L}_{curso}[mm]$	$L_{CursoMax}[mm]$	$L_{CursoMin}[mm]$	$\bar{U}[V]$	$\bar{P}[\mu W]$	$\bar{P}_{plataforma}[\mu W/m^2]$
Módulo 1	$0 < t \leq 30s$	4,7996	12,6213	$5,87 \cdot 10^{-4}$	0,0051	$4,83 \cdot 10^{-5}$	0,00966
	$30 < t \leq 60s$	3,5933	11,6962	0,0035	0,0029	$1,56 \cdot 10^{-5}$	0,00312
Módulo 3	$0 < t \leq 30s$	4,7996	12,6213	$5,87 \cdot 10^{-4}$	0,0051	$4,83 \cdot 10^{-5}$	0,00966
	$30 < t \leq 60s$	3,7226	12,5713	0,0079	0,0121	$2,59 \cdot 10^{-4}$	0,0518
Módulo 6	$0 < t \leq 30s$	4,7996	12,6213	$5,87 \cdot 10^{-4}$	0,0051	$4,83 \cdot 10^{-5}$	0,00966
	$30 < t \leq 60s$	3,5348	12,8259	0,0039	0,0056	$6,05 \cdot 10^{-5}$	0,0121
Módulo 6 Plataforma livre	$0 < t \leq 30s$	1,7437	7,5229	0,0037	0,0038	$4,82 \cdot 10^{-5}$	0,00964
	$30 < t \leq 60s$	1,1360	6,6974	0,0083	0,0028	$2,61 \cdot 10^{-5}$	0,00522

Capítulo 7

Discussão de Resultados e Conclusões

A partir dos resultados numéricos onde se considerou a plataforma completamente estática, compararam-se os resultados para dois perfis de onda: ondas com período de 1 segundo e ondas com período de 0,5 segundos. A partir destes resultados conclui-se que, para ondas com maior comprimento de onda (período 1 segundo), os módulos teriam um curso maior, próximo do curso total das ondas, com movimento aproximado ao sinusoidal. Para ondas de 0,5 segundos, os módulos apresentavam um curso médio bastante inferior quando comparado com a altura da onda. Nestas condições os módulos apresentam movimentos com ligeiras perturbações nas zonas de pico, as quais interferem na média do curso destas ondas, razão pela qual esta é 36% da média de curso do módulo em ondas de 1 segundo de período. O movimento dos módulos nesse caso é inconstante ao longo do tempo, contrariamente ao primeiro perfil de ondas. Tanto a tensão como a potência, de acordo com os resultados numéricos, é consideravelmente superior para ondas com menor comprimento de onda.

Os resultados experimentais divergiram dos resultados teóricos: em todos os testes os módulos apresentaram um curso médio superior para testes com ondas de maior comprimento. Apesar do módulo 1 apresentar movimento mais variável para ondas de menor curso de geração, o mesmo não se demonstrou no estudo dos módulos 3 e 6. Por outro lado, em ambas as condições de testes registaram-se perturbações no pico da onda, no entanto não eram constantes ao longo dos testes. Os valores de tensão e potência são variáveis quando comparados com os resultados esperados numericamente. A potência obtida é bastante inferior à esperada, sendo que, em ambos os casos são potências relativamente baixas. No entanto, utilizou-se uma resistência de carga bastante elevada o que implica menor corrente a passar nos enrolamentos. A transferência de potência para a carga seria máxima se a impedância interna do gerador igualasse a impedância de carga. Tendo em conta que as ondas do primeiro perfil tinham uma altura de 20 mm, o máximo de curso realizado foi de 70% desse curso no teste do módulo 3. O segundo perfil tinha ondas médias de 18 mm de altura e o máximo curso foi de 71% desse valor. Como se considerou uma eficiência de 100% nas simulações seria de esperar que os resultados teóricos se apresentassem dispersos. Esses resultados não tem em consideração os atritos entre os módulos e a plataforma, assim como movimentos noutras direções para além da direção vertical considerada nas simulações teóricas. Comparando a plataforma apoiada

ao fundo com a plataforma livre, a plataforma livre tem um desempenho inferior.

Em termos funcionais o maior problema para realizar uma plataforma flutuante trata-se do equilíbrio entre o peso e as dimensões, de forma a manter a plataforma estática ao mesmo tempo que a sua zona submersa não atenua o efeito das ondas. Nos ensaios verificou-se que a plataforma livre apresentava mais movimento quando as ondas eram iguais ou superiores ao comprimento da plataforma, portanto assumir inicialmente um comprimento superior ao comprimento das ondas é um pressuposto correto. Como constatado, a zona de curso do íman no interior da bobina deveria ser elevada e o conceito inicialmente desenvolvido não funciona. Devido às múltiplas falhas dos vedantes, o tubo bobinado deveria ser colocado no interior da plataforma, porém, essa solução poderia reduzir o efeito dos ímanes na bobina, já que existiria mais uma zona de material entre os dois componentes. Em casos de ondas mais extremas os ímanes estariam em risco de entrar em contato com a água.

Concluindo, apresentou-se nesta dissertação um protótipo de um mecanismo de conversão da energia das ondas funcional, cumprindo assim os objetivos propostos. De notar que este conceito pode ser adaptado a um gerador pneumático, hidráulico ou mecânico, aumentando o seu potencial para gerar energia ou adaptar-se a diferentes zonas marítimas. Este protótipo permitiu adquirir conhecimentos sobre possíveis melhorias em termos de estrutura e conversão de energia, sendo um bom ponto de partida para uma futura evolução do conceito até um protótipo viável e funcional em alto mar.

Capítulo 8

Projetos Futuros

Concluiu-se que o conceito proposto neste documento para o protótipo gera energia e tem margem para evoluir. No entanto, a energia apresentada foi calculada a partir da tensão medida, logo, o passo seguinte passaria por medir a potência diretamente e validar os resultados. Seguidamente seria vantajoso desenvolver um novo protótipo com base nas falhas do protótipo construído. O ponto crítico desta evolução será o estudo da forma e dimensões da plataforma para manter-se estática no máximo de estados marítimos possíveis. A posição inicial do módulo deve permitir mover o íman ao longo de todo o curso, ao mesmo tempo que a boia tem impulsão suficiente para se mover. Não menos importante, o reposicionamento das bobinas de forma a permanecerem completamente isoladas das condições agressivas do meio marítimo. O mesmo deveria ser considerado para os ímanes. Assim, o passo seguinte passaria por desenvolver um novo protótipo que respondesse a estes requisitos e aproximasse os resultados de energia aos resultados da plataforma fixa. Na figura 8.1 encontra-se a proposta de uma estrutura para a plataforma, cujas laterais não devem submergir totalmente de forma a manter zonas das bobinas distancias da superfície da água, como se viu ser necessário ao longo dos testes experimentais feitos ao primeiro protótipo.

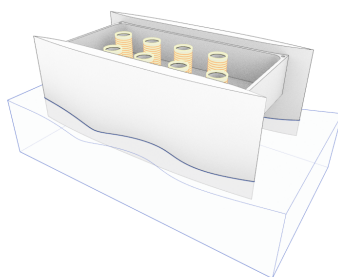


Figura 8.1: Proposta de nova configuração da plataforma e incorporação das bobinas.

Após se encontrar a melhor estrutura da plataforma, seria interessante adaptar o conceito para diferentes geradores (mecânicos, hidráulicos e pneumáticos) e encontrar o gerador com maior potencial de geração de energia. Com a otimização da estrutura e do gerador completa, seria interessante diminuir a escala do protótipo e realizar testes em tanques de ondas de maior dimensão e com maior controlo na geração de ondas.

Referências

- [1] Estatísticas Rápidas nº170 - Dezembro de 2018. Direção Geral de Energia e Geologia; 2018.
- [2] Plano Nacional De Acção Para as Energias Renováveis ao Abrigo Da Diretiva 2009/28/CE. República Portuguesa; 2009.
- [3] Machrafi H, editor. Green Energy and Technology. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS; 2012.
- [4] Zonas Marítimas sob Jurisdição e ou Soberania Nacional - DGRM;. Disponível em <https://www.dgrm.mm.gov.pt/am-ec-zonas-maritimas-sob-jurisdicao-ou-soberania-nacional>.
- [5] Firmino T. Mapa onde se mostra que 97% de Portugal é mar chega hoje às escolas. PÚBLICO;Disponível em <https://www.publico.pt/2014/04/02/ciencia/noticia/mapa-que-mostra-que-97-de-portugal-e-mar-chega-as-escolas-1630635>.
- [6] Rede de boias;. Disponível em <http://www.hidrografico.pt/boias>.
- [7] Silva D, Martinho P, Guedes Soares C. Wave energy distribution along the Portuguese continental coast based on a thirty three years hindcast. Renewable Energy. 2018 Novembro;127:1064–1075.
- [8] Mota P, Pinto JP. Wave energy potential along the western Portuguese coast. Renewable Energy. 2014 Novembro;71:8–17.
- [9] Mork G, Barstow S, Kabuth A, Pontes MT. Assessing the Global Wave Energy Potential. In: 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; Volume 3. Shanghai, China: ASME; 2010. p. 447–454.
- [10] Ye S, Wang WJ, Li B, Mao LB. The Study on Technology of Ocean Wave Energy Generation. Advanced Materials Research. 2013 Agosto;724-725:818–822.
- [11] Tan J, Duan J, Zhao Y, He B, Tang Q. Generators to harvest ocean wave energy through electrokinetic principle. Nano Energy. 2018 Junho;48:128–133.
- [12] Pecher A, Kofoed JP, editors. Handbook of Ocean Wave Energy. Ocean Engineering & Oceanography. Springer International Publishing; 2017.
- [13] Falcão AFdO. Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010 Abril;14(3):899–918.

- [14] Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2009 Dezembro;223(8):887–902.
- [15] Gamarra C, Guerrero JM. Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Agosto;48:413–424.
- [16] Green DnDn. Portugal's Pelamis Wave Power Project Killed;.
- [17] Falcão AFdO. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010 Abril;14(3):899–918.
- [18] Benning H. The pros and cons of wave power. First edition ed. *The economics of energy*. New York: Cavendish Square; 2016.
- [19] Cpower Why Wave Energy?;. Available from: <https://columbiapwr.com/why-wave-energy/>.
- [20] Andrew Williams. *Maritime Journal | Eco Wave Power completes installation of innovative device in Gibraltar*. 2016 Maio;.
- [21] How it works;. Disponível em <https://www.ecowavepower.com/our-technology/how-it-works/>.
- [22] Karimirad M. *Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms*. Springer International Publishing; 2014.
- [23] Ransley EJ, Greaves DM, Raby A, Simmonds D, Jakobsen MM, Kramer M. RANS-VOF modelling of the Wavestar point absorber. *Renewable Energy*. 2017 Agosto;109:49–65.
- [24] Hals J, Babarit A, Krokstad J, Muliawan MJ, Kurniawan A, Moan T. The NumWEC project. Numerical estimation of energy delivery from a selection of wave energy converters – final report. 2015;.
- [25] You Y, Sheng S, Wu B, He Y. Wave energy technology in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012 Janeiro;370(1959):472–480.
- [26] Greaves D, Iglesias G. *Wave and tidal energy*; 2018.
- [27] Chen A, You Y, Sheng S, Lin H, Ye Y, Huang S. Nonlinear analysis of the crashworthy component of an eagle wave energy converter in rotating-collision. *Ocean Engineering*. 2016 Outubro;125:285–294.
- [28] Ilyas A, Kashif SAR, Saqib MA, Asad MM. Wave electrical energy systems: Implementation, challenges and environmental issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Dezembro;40:260–268.
- [29] Ding B, Cazzolato BS, Arjomandi M, Hardy P, Mills B. Sea-state based maximum power point tracking damping control of a fully submerged oscillating buoy. *Ocean Engineering*. 2016 Novembro;126:299–312.

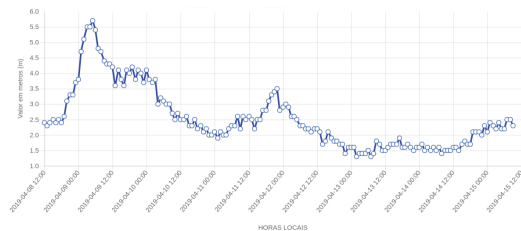
- [30] Going deep to harness wave power: Carnegie's CETO systems;. Disponível em <https://www.power-technology.com/features/featuregoing-deep-to-harness-wave-power-carnegies-ceto-systems-4855445/>.
- [31] Poullikas A. Technology prospects of wave power systems. *Electronic Journal of Energy & Environment*. 2014 Abril;2(1):47–69.
- [32] Babarit A. 2 - Wave Energy Conversion Historical Perspective. In: Babarit A, editor. *Wave Energy Conversion*. Elsevier; 2017. p. 37–98.
- [33] Smith PF, Rogers RG. *Climate change and cultural heritage: a race against time*. Routledge explorations in environmental studies. London New York: Routledge; 2015.
- [34] Jason Ford. Searaser device promises "lowest-cost" offshore power; 2010. Disponível em <https://www.theengineer.co.uk/searaser-device-promises-lowest-cost-offshore-power/>.
- [35] Karl Erik Kaasen. Model testing of wave-power plants», *Marintek Review*. 2011 Novembro;(3):11.
- [36] Joseph Bennington-Castro. Why wave power may be the next big thing in green energy; 2017.
- [37] Nachev A. Comparative analysis of winch-based wave energy converters; 2017. Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-209539>.
- [38] Bolt Lifesaver Technical Introduction – Boltseapower;. Disponível em <https://boltseapower.com/bolt-lifesaver-technical-introduction/>.
- [39] Badescu V, Lazaroiu GC, Barelli L. *Power engineering: advances and challenges*; 2018.
- [40] WaveRoller – AW Energy Oy;. Disponível em <https://aw-energy.com/waveroller/>.
- [41] Pedersen Zari M. *Regenerative urban design and ecosystem biomimicry*. Routledge research in sustainable urbanism. London New York, NY: Routledge; 2018.
- [42] McNeil M. Wave energy pilot to launch. *The Standard*. 2017 Março;.
- [43] bioWAVE | BPS | Ocean Energy;. Disponível em <http://bps.energy/biowave>.
- [44] Pecher A, Kofoed JP, Espedal J, Hagberg S. Results of an Experimental Study of the Langlee Wave Energy Converter. *International Society of Offshore and Polar Engineers*; 2010. .
- [45] Monk K, Winands V, Lopes M. Chamber pressure skewness corrections using a passive relief valve system at the pico oscillating water column wave energy plant. *Renewable Energy*. 2018 Dezembro;128:230–240.
- [46] Pico OWC;. Disponível em <http://www.pico-owc.net/>.

- [47] Fernandez H, Iglesias G, Carballo R, Castro A, Fraguera JA, Taveira-Pinto F, et al. The new wave energy converter WaveCat: Concept and laboratory tests. *Marine Structures*. 2012 Dezembro;29(1):58–70.
- [48] Iglesias G, Carballo R, Castro A, Fraga B. DEVELOPMENT AND DESIGN OF THE WAVECAT™ ENERGY CONVERTER. In: *Coastal Engineering 2008*. Hamburg, Germany: World Scientific Publishing Company; 2009. p. 3970–3982.
- [49] Allen J, Sampanis K, Wan J, Greaves D, Miles J, Iglesias G. Laboratory Tests in the Development of WaveCat. *Sustainability*. 2016 Dezembro;8(12):1339.
- [50] Tedd J, Peter Kofoed J. Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. *Renewable Energy*. 2009 Março;34(3):711–717.
- [51] Parmeggiani S, Kofoed J, Friis-Madsen E. Experimental Update of the Overtopping Model Used for the Wave Dragon Wave Energy Converter. *Energies*. 2013 Abril;6(4):1961–1992.
- [52] Vicinanza D, Frigaard P. Wave pressure acting on a seawave slot-cone generator. *Coastal Engineering*. 2008 Junho;55(6):553–568.
- [53] Buccino M, Vicinanza D, Salerno D, Banfi D, Calabrese M. Nature and magnitude of wave loadings at Seawave Slot-cone Generators. *Ocean Engineering*. 2015 Fevereiro;95:34–58.
- [54] Algie C, Ryan S, Fleming A. Predicted power performance of a submerged membrane pressure-differential wave energy converter. *International Journal of Marine Energy*. 2017 Dezembro;20:125–134.
- [55] Bombora Wave Power eyes EU market, starting with 1.5MW Portugal project | RenewEconomy;. Disponível em <https://reneweconomy.com.au/bombora-wave-power-eyes-eu-market-starting-1-5mw-portugal-project-56590/>.
- [56] Anaconda rubber tube produces wave energy;. Disponível em <http://www.renewableenergyfocus.com/view/1733/anaconda-rubber-tube-produces-wave-energy/>.
- [57] Aggidis GA, Taylor CJ. Overview of wave energy converter devices and the development of a new multi-axis laboratory prototype. *IFAC-PapersOnLine*. 2017 Julho;50(1):15651–15656.
- [58] McKenna P. Riding the wave. *New Scientist*. 2011 Agosto;211(2827):17–18.
- [59] Checkmate Seaenergy » Technology;. Disponível em <https://www.checkmateukseaenergy.com/featured/technology/>.
- [60] Babarit A, Guglielmi M, Clément AH. Declutching control of a wave energy converter. *Ocean Engineering*. 2009 Setembro;36(12):1015–1024.
- [61] Cordonnier J, Gorintin F, De Cagny A, Clément AH, Babarit A. SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter. *Renewable Energy*. 2015 Agosto;80:40–52.

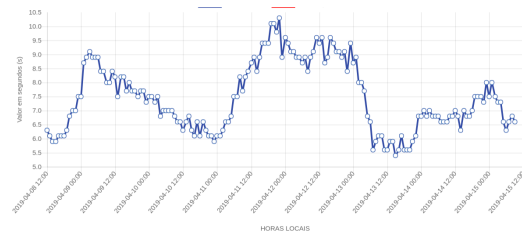
-
- [62] Bracco G, Giorcelli E, Mattiazzo G. ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation. *Mechanism and Machine Theory*. 2011 Outubro;46(10):1411–1424.
- [63] Laranjeira RAVM, laranjeira rm. Control of the Wave Energy Converter ISWEC in Simulation; 2016. .
- [64] Lynn PA. Electricity from wave and tide: an introduction to marine energy. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley; 2014.
- [65] EMEC achieves accolade for innovative green operations. *Renewable Energy Focus*. 2011 Setembro;12(5):4.
- [66] McPhee D. Wello Penguin wave converter set for second act - News for the Oil and Gas Sector; 2018.
- [67] Campbell A. Finnish firm for seabed 'socket'. *BBC News*. 2014 Fevereiro;.
- [68] Crowley S, Porter R, Taunton DJ, Wilson PA. Modelling of the WITT wave energy converter. *Renewable Energy*. 2018 Janeiro;115:159–174.
- [69] WITT - Harvesting Motion into Energy;. Disponível em <https://www.witt-energy.com/applications.html>.
- [70] Hultman E, Ekergård B, Kamf T, Salar D, Leijon M. Preparing the Uppsala University wave energy converter generator for large-scale production; 2014. .
- [71] Lejerskog E, Boström C, Hai L, Waters R, Leijon M. Experimental results on power absorption from a wave energy converter at the Lysekil wave energy research site. *Renewable Energy*. 2015 Maio;77:9–14.
- [72] Pecher A, Kofoed JP, Larsen T. The extensive R&D behind the Weptos WEC. In: *Renewable Energies Offshore: Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, Portugal, 24-26 November 2014*. CRC Press; 2015. p. 351–358.
- [73] Magagna D, Uihlein A. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*. 2015 Setembro;11:84–104.
- [74] Shi H, Huang S, Cao F. Hydrodynamic performance and power absorption of a multi-freedom buoy wave energy device. *Ocean Engineering*. 2019 Jan;172:541–549.
- [75] Shi H, Cao F, Liu Z, Qu N. Theoretical study on the power take-off estimation of heaving buoy wave energy converter. *Renewable Energy*. 2016 Fevereiro;86:441–448.
- [76] Jang TS, Baek H, Kim MC, Moon BY. A New Method for Detecting the Time-Varying Nonlinear Damping in Nonlinear Oscillation Systems: Nonparametric Identification. *Mathematical Problems in Engineering*. 2011;2011:1–12.
- [77] Sumer BM, Fredsøe J. Hydrodynamics Around Cylindrical Structures. vol. 26 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. Revised ed. WORLD SCIENTIFIC; 2006.
- [78] Rocha RME. Modelling of an electromagnetic generator using artificial neural networks. Universidade de Aveiro; 2018.

Anexo A

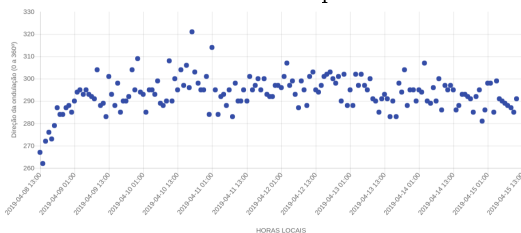
Dados das Boias Ondográficas



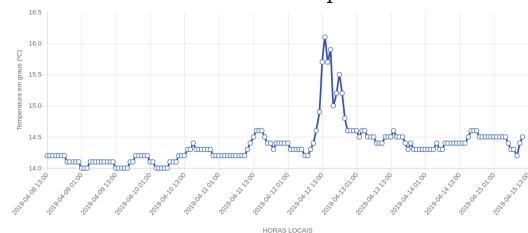
(a) Gráfico dos valores da altura significativa das ondas em Leixões durante o período de estudo.



(b) Gráfico dos valores do período médio das ondas em Leixões durante o período de estudo.

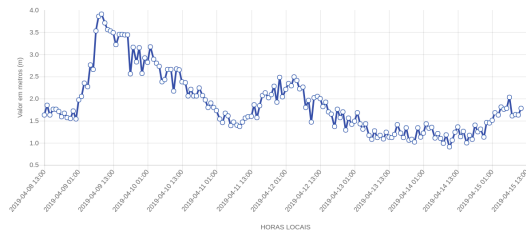


(c) Gráfico dos valores da direção das ondas em Leixões durante o período de estudo.

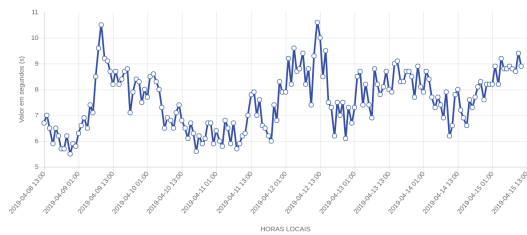


(d) Gráfico dos valores da temperatura da água em Leixões durante o período de estudo.

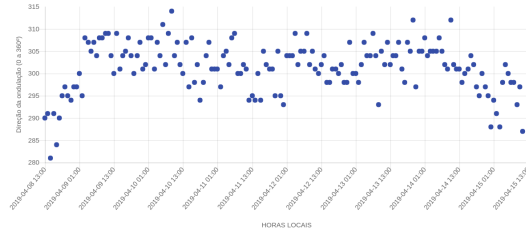
Figura A.1: Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Leixões (oceânica) na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019 .



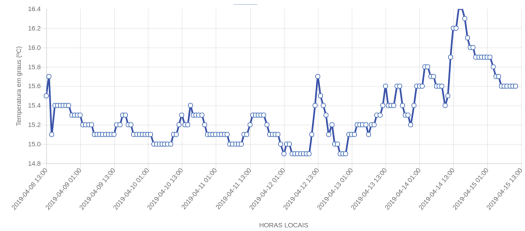
(a) Gráfico dos valores da altura significativa das ondas em Sines durante o período de estudo.



(b) Gráfico dos valores do período médio das ondas em Sines durante o período de estudo.

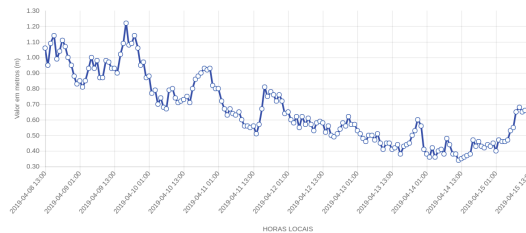


(c) Gráfico dos valores da direção das ondas em Sines durante o período de estudo.

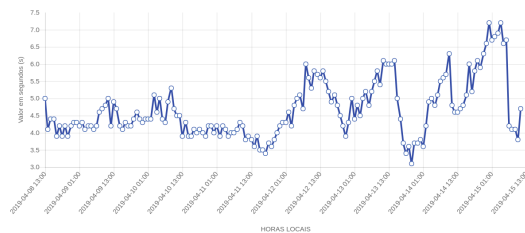


(d) Gráfico dos valores da temperatura da água em Sines durante o período de estudo.

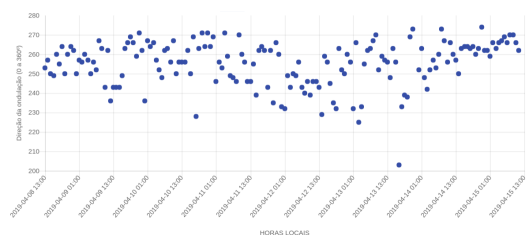
Figura A.2: Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Sines na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.



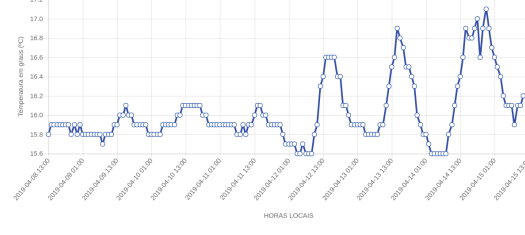
(a) Gráfico dos valores da altura significativa das ondas em Faro (costeira) durante o período de estudo.



(b) Gráfico dos valores do período médio das ondas em Faro (costeira) durante o período de estudo.

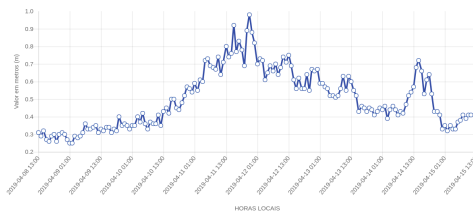


(c) Gráfico dos valores da direção das ondas em Faro (costeira) durante o período de estudo.

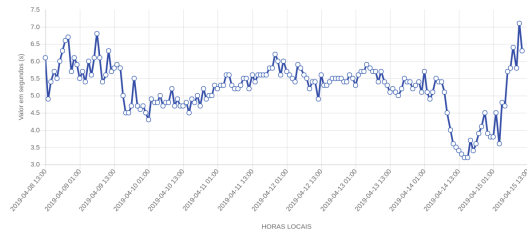


(d) Gráfico dos valores da temperatura da água em Faro (costeira) durante o período de estudo.

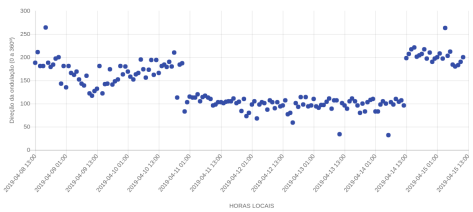
Figura A.3: Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada em Faro (costeira) na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.



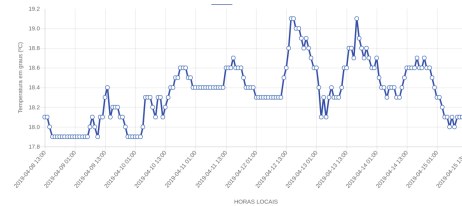
(a) Gráfico dos valores da altura significativa das ondas no Caniçal durante o período de estudo.



(b) Gráfico dos valores do período médio das ondas no Caniçal durante o período de estudo.

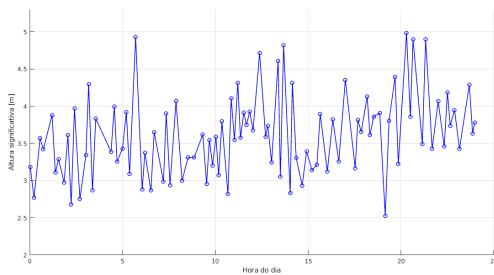


(c) Gráfico dos valores da direção das ondas no Caniçal durante o período de estudo.

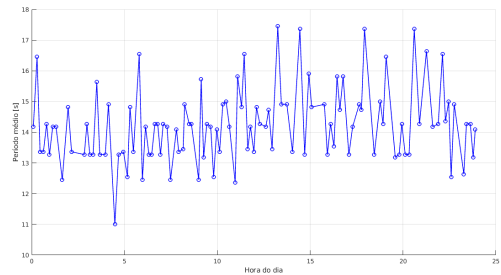


(d) Gráfico dos valores da temperatura da água no Caniçal durante o período de estudo.

Figura A.4: Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada no Caniçal na semana de 8 de Abril a 15 de Abril de 2019.



(a) Gráfico dos valores da altura significativa das ondas no Pico durante o período de estudo.

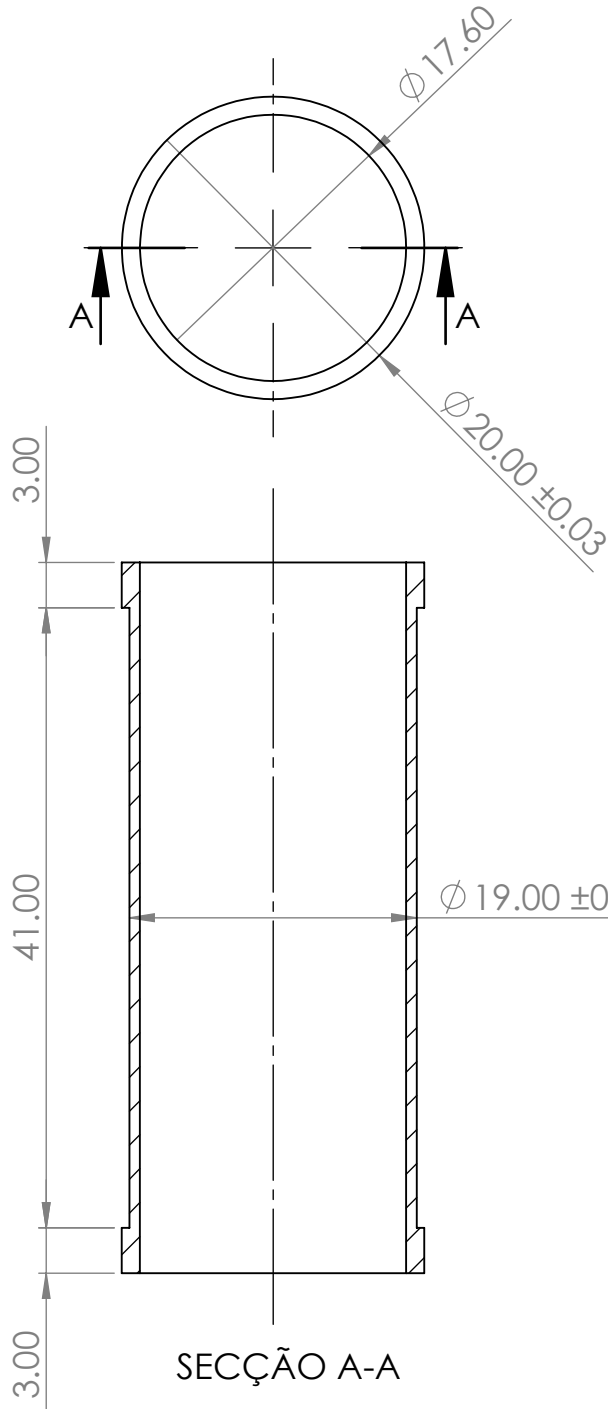


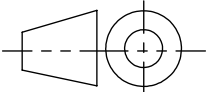
(b) Gráfico dos valores do período médio das ondas no Pico durante o período de estudo.

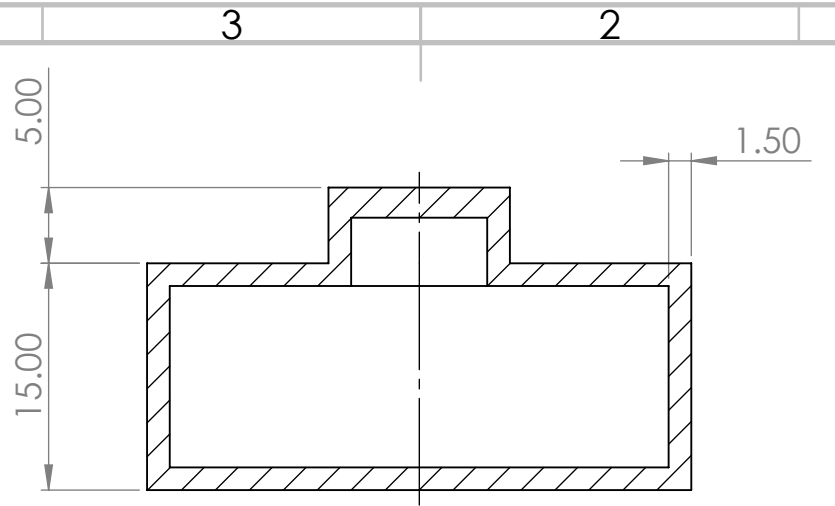
Figura A.5: Gráficos dos dados adquiridos pela boia situada no Pico no dia 15 de Abril de 2019.

Anexo B

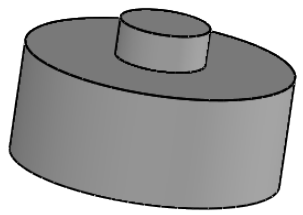
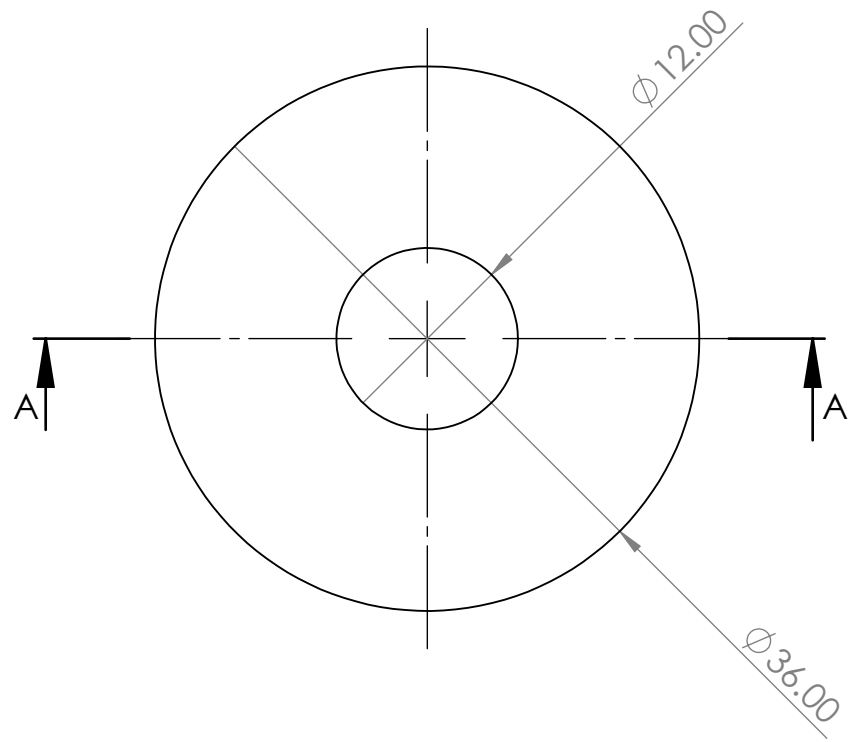
Desenhos Técnicos dos Componentes do Protótipo

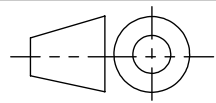


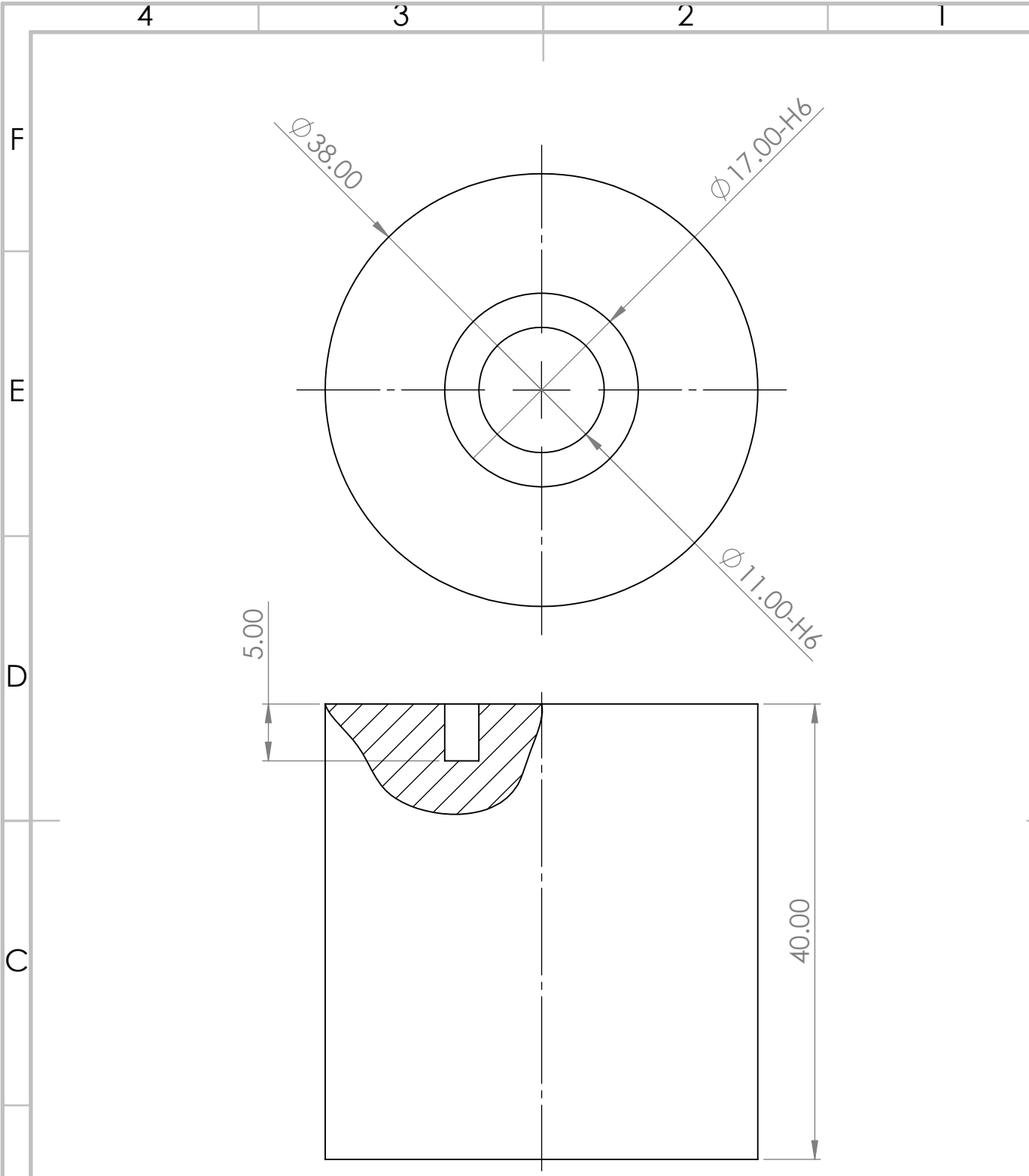
NOME		DATA	INSITUIÇÃO	TÍTULO	
Desenho	Daniela Valente			Tubo para bobinar	
Verific.					
Aprov.					
FOLHA		ESCALA	MATERIAL:	NÚMERO	 SHEET 1 OF 1
A4		1:2	PVC	9	



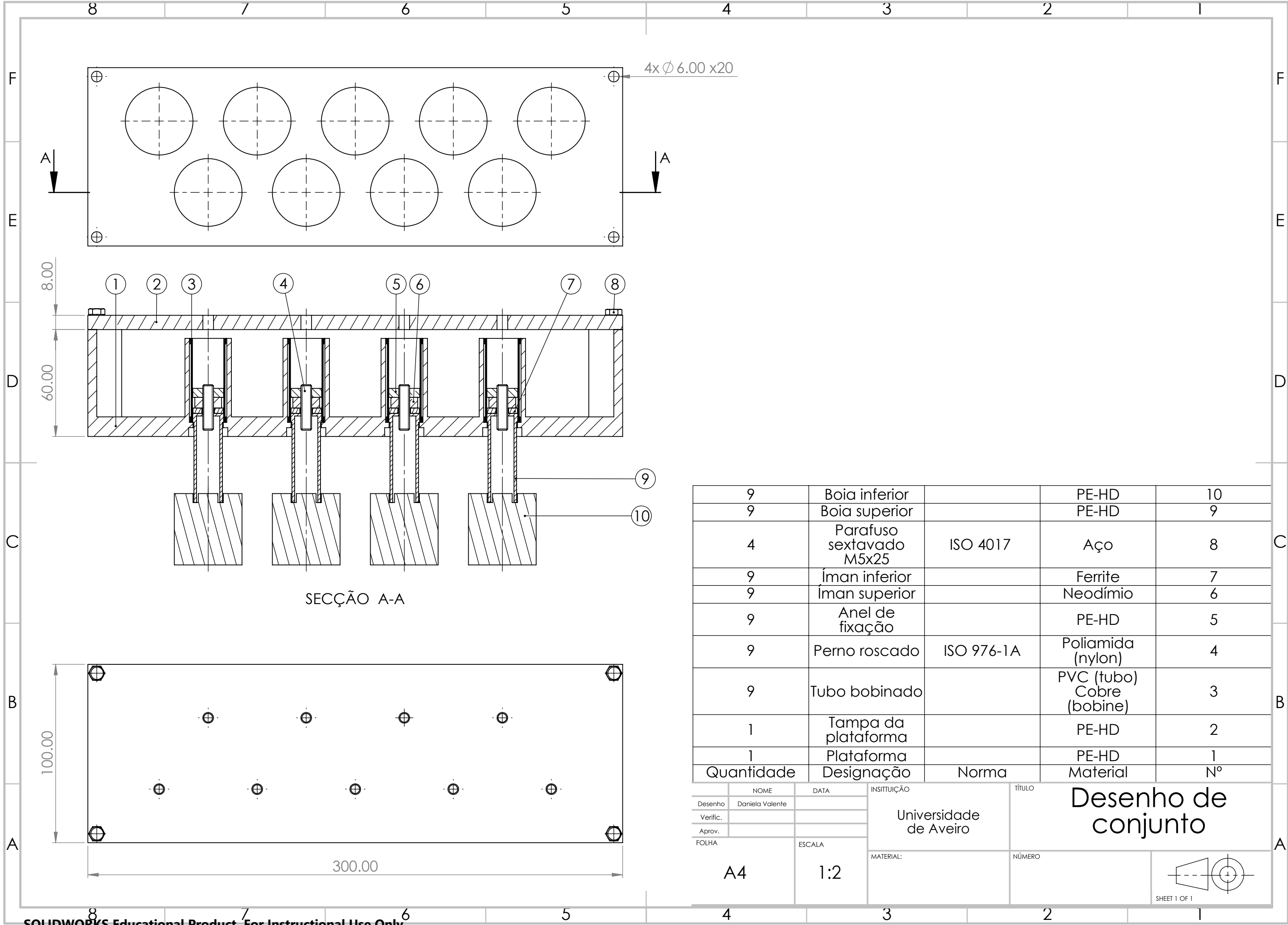
SECÇÃO A-A



NOME		DATA	INSITUIÇÃO	TÍTULO	
Desenho	Daniela Valente			Boia inferior	
Verific.					
Aprov.					
FOLHA		ESCALA	MATERIAL:	NÚMERO	 SHEET 1 OF 1
A4		1:2	PLA	10	



NOME		DATA	INSITUIÇÃO	TÍTULO	
Desenho	Daniela Valente			Boia inferior	
Verific.					
Aprov.					
FOLHA		ESCALA	MATERIAL:	NÚMERO	 SHEET 1 OF 1
A4		1:2	Poliestireno expandido	10	



9	Boia inferior		PE-HD	10
9	Boia superior		PE-HD	9
4	Parafuso sextavado M5x25	ISO 4017	Aço	8
9	Íman inferior		Ferrite	7
9	Íman superior		Neodímio	6
9	Anel de fixação		PE-HD	5
9	Perno roscado	ISO 976-1A	Poliamida (nylon)	4
9	Tubo bobinado		PVC (tubo) Cobre (bobine)	3
1	Tampa da plataforma		PE-HD	2
1	Plataforma		PE-HD	1
Quantidade	Designação	Norma	Material	Nº

	NOME	DATA	INSITUIÇÃO	TÍTULO
Desenho	Daniela Valente		Universidade de Aveiro	Desenho de conjunto
Verific.				
Aprov.				
FOLHA		ESCALA	MATERIAL:	NÚMERO
A4		1:2		
SHEET 1 OF 1				